Министерство образования и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

А. В. Пуговкин

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Учебное пособие

Томск
«Эль Контент»
2014

УДК [621.39 + 654.1](075.8)
ББК 32.88я73
П 880

Рецензенты:
Богомолов С. И., канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа;
Бацула А. П., канд. техн. наук, советник генерального директора научно-производственной фирмы «Микран».

Пуговкин А. В.
П 880 Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей : учебное пособие / А. В. Пуговкин. — Томск : Эль Контент, 2014. — 156 с.

ISBN 978-5-4332-0148-4

В основу учебного пособия положены материалы лекционных и практических занятий, проводимых автором на радиотехническом факультете и на факультете вычислительных систем Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

Рассмотрены основные принципы построения телекоммуникационных систем, дана их классификация, представление о модели взаимодействия открытых систем. Приводится информация по сигналам и каналам электрической связи. Рассмотрены аналоговые системы передачи на базе частотного разделения каналов и цифровые системы передачи (плезиохронная и синхронная цифровые иерархии). Приведены описания и основные характеристики линий связи на симметричном кабеле и волоконнооптические линии связи. Описаны системы распределения информации с пространственной и временной коммутацией. Рассмотрены системы распределения для сетей передачи данных.

УДК [621.39 + 654.1](075.8)
ББК 32.88я73

ISBN 978-5-4332-0148-4

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время характеризуется стремительными темпами развития телекоммуникаций. В течение 1020 лет в массовые услуги связи вошли доступ в Интернет и сотовая связь, факс и электронная почта. За счет внедрения волоконнооптических линий связи, цифровых систем передачи и объемов представляемого трафика появилось много новых телекоммуникационных технологий: IP-телефония, ADSL, ATM и др.

Широкое внедрение компьютеров в производственную деятельность и повседневную жизнь также стимулирует развитие телекоммуникаций, требует существенной скорости передачи информации, повышения качества обслуживания. Цифровые методы обработки телекоммуникационных сигналов, цифровых технологий распределения информации и управления сетями приводят к слиянию информационных и телекоммуникационных технологий.

Основные услуги телекоммуникаций можно разделить на следующие виды:

- телеметрия,
- телефония,
- радиовещание,
- передача данных ПД (доступ в Интернет, электронная почта и др.),
- телевидение,
- цифровое телевидение.

Эти услуги различаются как по необходимой скорости передачи информации, так и по времени сеанса. Эти отличия иллюстрируются рисунком 1, из которого следует, что самые низкие скорости передачи и время сеанса требуются для телеметрии, когда сигналы с нескольких датчиков (давления, температуры, влажности и т. п.) передаются в центр управления. Самые большие объемы скорости и длительности сеанса необходимы для телевидения (TV), телевидения высокого качества (ТВВК) и скоростного доступа в Интернет. Телефония и радиовещание занимают промежуточное положение.

Важным выводом из этого рисунка является то, что современные телекоммуникационные системы должны обеспечивать одновременно все эти услуги, передавать низкоскоростные и высокоскоростные потоки в одних и тех же каналах связи. Да и по времени сеанса требования достаточно жесткие, так как системы должны работать практически непрерывно с высокой надежностью.

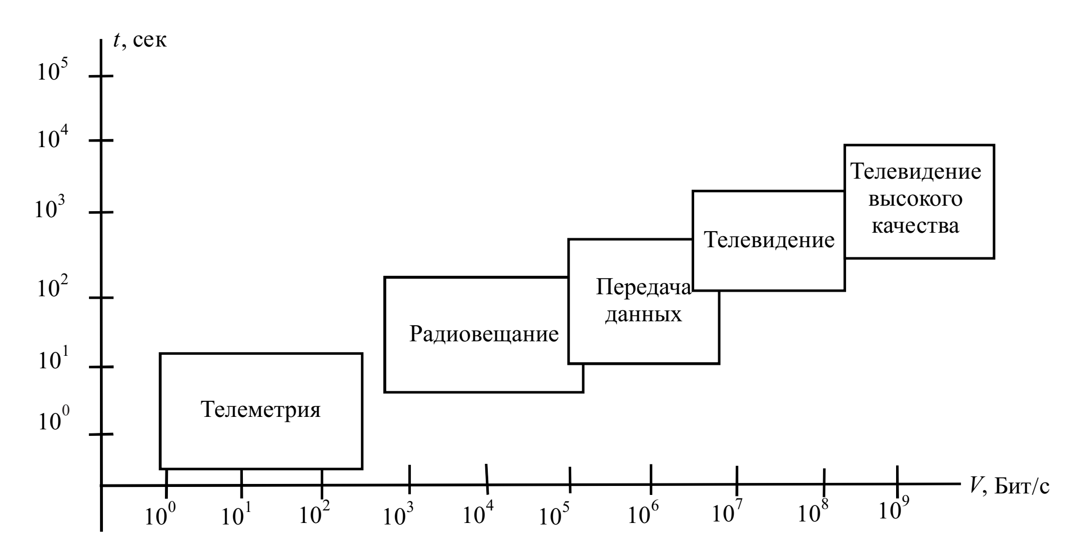


Рис. 1 – Услуги электросвязи

В развитии электросвязи на современном этапе существует ряд тенденций, качественно меняющих понятие и содержание привычных для нас услуг телефонии и телевидения:

1. *Цифровизация*. Переход к цифровым сигналам обеспечивает высокую помехоустойчивость передачи, повышает ее качество и надежность, существенно сокращает вес и габариты оборудования. Поскольку представление цифрового сигнала одинаково для всех видов трафика, то это создает реальную платформу для их объединения в одном канале передачи.

2. *Пакетизация*. Заключается в том, что цифровой поток разбивается на отдельные порции (пакеты). Каждому пакету добавляется заголовок, в котором содержится адрес получателя. В телекоммуникационной сети каждый пакет может продвигаться самостоятельно с помощью протоколов маршрутизации. Достоинство такой технологии заключается в том, что степень загруженности телекоммуникационных каналов приближается к 100%, поскольку в одном канале одновременно могут передаваться пакеты различных абонентов.

3. *Глобализация*. Практически телекоммуникационные сети приобретали всемирный характер. Это касается и телефонии, когда мы можем связаться с абонентом в любой стране, и передачи данных (сеть Интернет). Примерами глобальных сетей также являются сети сотовой связи (GSM, NMT и др.), сети спутниковой связи.

4. *Персонализация*. С появлением сотовых телефонов, терминалов спутниковой связи телекоммуникации все больше привязываются не к месту нахождения терминала (телефонный аппарат, телевизор и т. п.), а к персоне-человеку, который носит или возит терминал с собой.

5. *Мобильность*. Эта тенденция существовала и раньше, но сейчас она развивается в массовых средствах связи, благодаря развитию технологий радиосвязи, которые являются беспроводными и поэтому обеспечивают услугами абонентов, находящихся в движении, как при перемещении пешком, так и в автомобиле или даже самолете или космическом аппарате.

6. *Интеграция* услуг заключается в том, что к абоненту по одной линии связи приходят электрические сигналы разных служб. Здесь с помощью устройства распределения услуг они разделяются по соответствующим терминальным устрой-

ствам (телефонный аппарат, модем, телевизионный приемник и т. д.). Самым радикальным случаем является тот, когда по линии связи одновременно приходят услуги телефонии, телевидения и передачи данных. Однако на настоящий момент для массового абонента такого сервиса еще нет, и на практике применяют попарную интеграцию. Рассмотрим развитие услуг и возможные варианты интеграции с помощью диаграммы (рис. 2).

Здесь рассмотрены только три услуги, а именно: передача речи, данных и программ телевидения. Рассмотрим зарождение и развитие этих услуг.

1. *Телефония*. Телефонная связь зародилась в 70-е годы 19 века. В качестве пионеров телефонии следует назвать: А. Белла (США) — изобретение телефона (1876 год), М. Махальского (Россия) — изобретение микрофона (1878 год), П. Голубицкого (Россия) — применение центральной батареи для абонентских телефонных аппаратов.

Основные элементы технологии телефонии сохранились и по сей день. Эту телефонную связь называют аналоговой телефонией потому, что в процессе передачи используются аналоговые сигналы, возникающие на выходе телефонной трубки. При объединении сигналов от различных абонентов используется технология от частного разделения каналов (ЧРК). При ЧРК эти сигналы занимают разные непересекающиеся участки частотного диапазона. Наглядный пример ЧРК: разделение радиовещательных и телевизионных программ. Подробно ЧРК будет рассмотрено в разделе 2.3 при описании модуляции. Соединение абонентов друг с другом осуществляется посредством коммутации каналов (КК), когда между двумя абонентами устанавливается сквозное соединение с помощью коммутаторов. Заказ на установление этого соединения делает сам абонент, набирая номер. Разрыв соединения также происходит по инициативе одного из абонентов. Часто такое соединение называют коммутируемым. Этот вид электрической связи на настоящий момент является самым массовым, несмотря на заметные недостатки: невысокое качество связи, ограниченные возможности интеграции, низкий уровень сервиса.

Широкое внедрение цифровых технологий привело к появлению в электросвязи цифровых систем передачи и цифровой телефонии. Основными отличительными особенностями этой технологии являются: преобразование аналогового телефонного сигнала в цифровой (последовательность импульсных сигналов, передающих значения «0» и «1»), объединение цифровых сигналов разных абонентов с помощью уплотнения их во времени — временное разделение каналов (ВРК). Вместе с тем технология коммутации остается прежней — коммутация каналов.

Наконец, в конце 90-х годов прошлого столетия родилась еще одна телефонная технология — IP-телефония, которая принципиально отличается от предыдущих способом коммутации. Здесь так же, как и в цифровой телефонии, формируется цифровой сигнал, но затем он разбивается на пакеты. Каждый пакет содержит в заголовке адрес назначения, поэтому пакеты могут добираться до абонентов самостоятельно.

Но главным достоинством пакетных методов передачи является возможность передавать по одному каналу связи пакеты нескольких пар абонентов одновременно. При этом коэффициент использования канала приближается к 100%. Разумеется, что IP-телефония, как и другие пакетные методы передачи речи, возникли не сами по себе, а на базе технологий передачи данных, технологий компьютерных сетей.

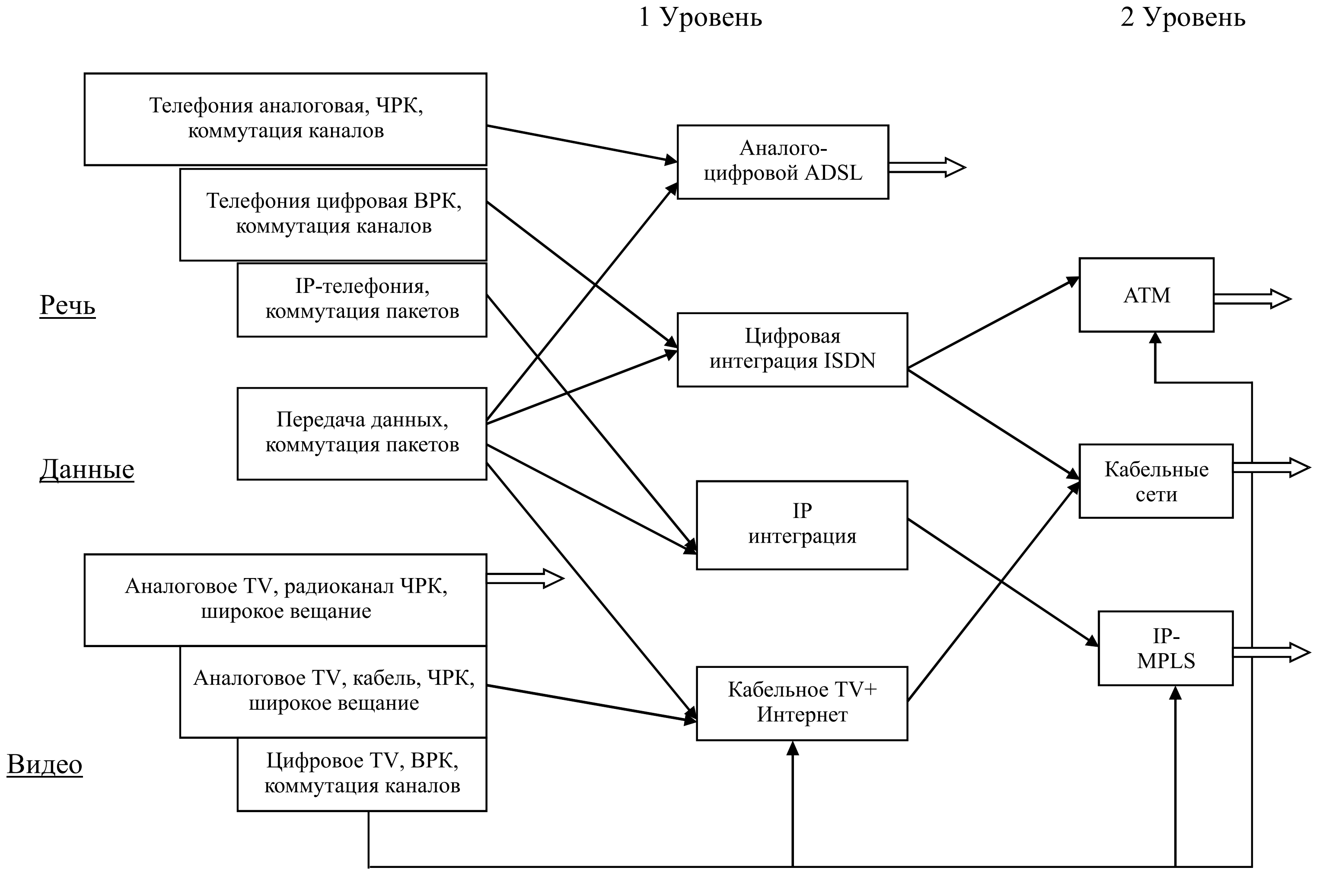


Рис. 2 – Развитие и интеграция услуг

2. *Передача данных*. Этот вид телекоммуникационных услуг появился сравнительно недавно в 60-х годах прошлого века в связи с развитием локальных и глобальных вычислительных сетей. Сначала компьютеры связывались в сети для того, чтобы увеличить общую производительность. Однако вскоре потребовался доступ нескольких компьютеров к общим ресурсам (принтер, серверы и т. п.). Появилась необходимость у компьютерных пользователей обмениваться данными друг с другом. И, наконец, появилась глобальная информационная сеть Интернет. И всем пользователям потребовался выход в нее. Услуга стала массовой. Поскольку передача данных принципиально отличается от телефонии, то и требования к этим сетям совсем другие. Здесь нужна высокая вероятность передачи (-10^{-8}–10^{-9}), в то время как малая задержка сигнала, важная для телефонии, здесь не является критичной. Требования по скорости передачи в сетях передачи данных (СПД) изменяются в широких пределах от нескольких десятков килобит в секунду (Кбит/с) для абонентского доступа до единиц гигабит в секунду (Гбит/с) на магистральных сетях.

3. *Телевидение*. Исторически первым появилось «эфирное» телевидение, когда передатчик телевизионной станции излучает радиоволны для всех абонентов, имеющих телевизионные приемники в зоне действия станции (рис. 3).

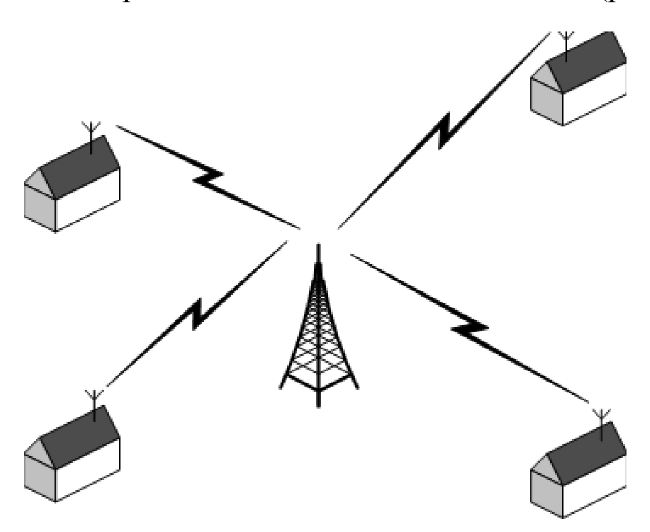


Рис. 3 – Широковещательное «эфирное» телевидение

Такой режим распределения информации называется широковещательным, и он принципиально отличается от режима коммутации, применяемого в телефонии и передаче данных. Сигналы телевидения являются аналоговыми, как и в телефонии, но они имеют гораздо более сложную структуру, потому что телевизионное изображение имеет двумерный формат, речь одномерна (изменяется только во времени). Для того чтобы передавать несколько телевизионных программ, используется ЧРК, так же как в аналоговой телефонии.

Эта телевизионная услуга сейчас является самой массовой, так как она не требует строительства кабельных линий связи для абонентов. Качество передаваемых изображения и звука здесь не может быть очень высоким, так как на него влияют условия распространения радиоволн (осадки, многократные отражения от зданий, затенения). Сейчас у «эфирного» телевидения, как у массовой услуги, появился конкурент — кабельное телевидение, которое развивается, начиная с 80-х годов

20 века. В его основе также лежат аналоговые сигналы, ЧРК и принцип широкого вещания. Здесь сигналы от головной станции передаются к абонентам по специально проложенной кабельной сети (рис. 4).

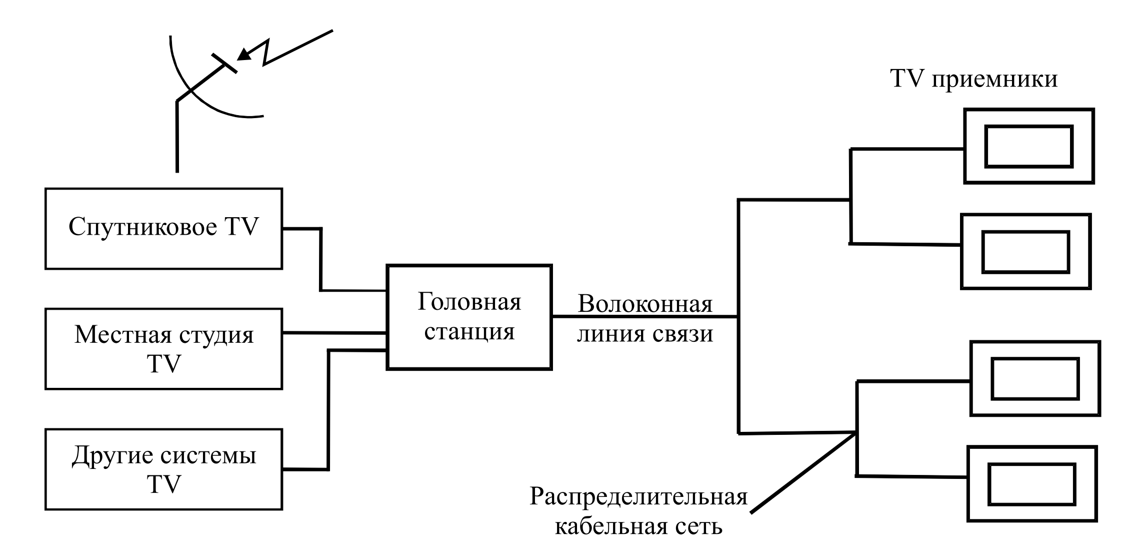


Рис. 4 – Системы кабельного телевидения

Это обеспечивает более высокое качество передачи и позволяет услугу сделать платной, так как кабельный ввод в квартиру может быть отключен в случае неуплаты. Телевизионные приемники у абонентов здесь используются те же самые, что и при обычном телевидении.

В ближайшей перспективе появление высококачественной массовой услуги — цифрового телевидения. Она уже реализуется, начиная с 90-х годов прошлого века. В ее основе лежат преобразование аналогового телевизионного сигнала в цифровой, использование ВРК и технологии коммутации каналов. Несомненными достоинствами цифрового телевидения являются высокое качество передачи программ, адресная передача по запросу. Сдерживает массовое внедрение услуги необходимость приобретения специального телевизионного приемника, который пока является достаточно дорогим. Технологический прогресс в скором времени позволит преодолеть этот недостаток. Способы передачи сигналов цифрового телевидения могут быть самыми разными: по радиоканалам, по сетям кабельного телевидения и даже по телефонным сетям с использованием специальных модемов.

Рассмотрев базовые технологии электросвязи, займемся возможными способами их интеграции. Наиболее просто решаются задачи объединения двух услуг. Назовем это первым уровнем интеграции. Здесь с технической точки зрения проще интегрировать телефонию и передачу данных. В соответствии с диаграммой (рис. 2) возможны и развиваются 3 варианта:

1. Аналого-цифровая интеграция, когда канал тональной частоты (телефонный канал), используя ЧРК, объединяется с цифровым каналом передачи данных. Наиболее распространена технология ADSL.
2. Цифровая интеграция, в которой на принципах ВРК объединяются цифровые потоки телефонии и передачи данных — это технологии ISDN-BRI и PRI.

3. Интеграция на базе IP — протоколов, когда речь и данные передаются в виде пакетов.

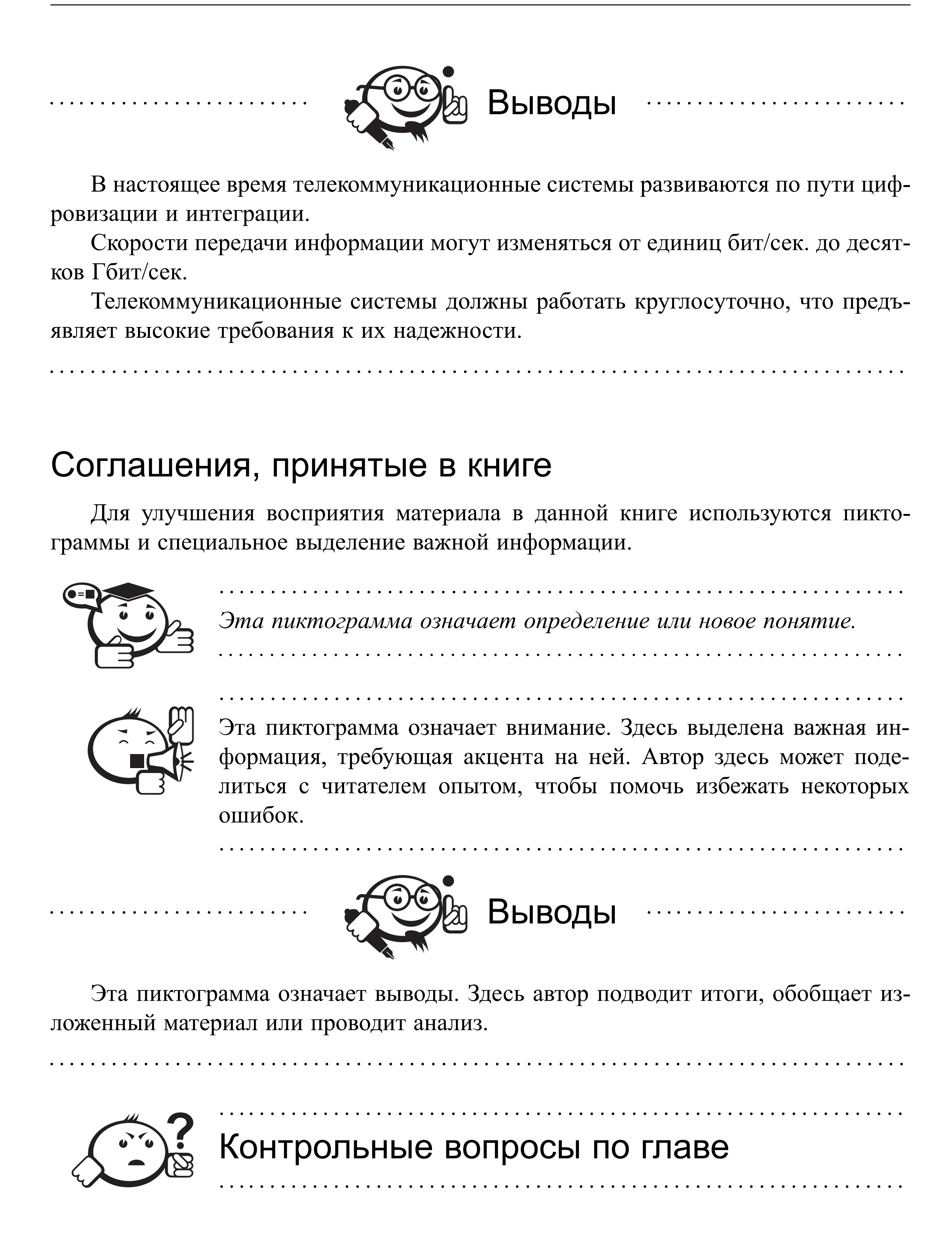
Кроме этого, реализуются и другие варианты интеграции 1 уровня. Наиболее распространена схема объединения сигналов аналогового кабельного телевидения и передачи данных (доступ в Интернет). Это не означает, что не появятся другие варианты интеграции 1 уровня, например «Речь-Телевидение» в аналоговом, цифровом или комбинированном исполнении.

Если технологии первого уровня интеграции находятся на этапе массового внедрения, то полная интеграция (2 уровень) испытывает стадию экспериментальных исследований и опытного внедрения. В настоящее время наибольшую известность имеют технологии:

- ATM — специально разработанная для полной интеграции, способная обеспечить разные уровни сервиса, высокие скорости передачи и другие достоинства цифровых технологий. Основным ее недостатком является высокая стоимость оборудования, что сдерживает широкое внедрение.
- IP MPLS — эволюционирует от услуг по передаче данных, постепенно включая в себе телефонию, а затем и телевидение. Такой подход является более рациональным и менее затратным, хотя по техническим характеристикам IP-технологии уступают ATM. Более совершенным вариантом технологии IP MPLS является NGN (Next Generation Networks).
- Не менее прогрессивным является способ интеграции 2 уровня на базе кабельного телевидения, так как на участках передачи сигналов от головной станции к домовым узлам коаксиальный кабель заменяется на волоконно-оптические линии.

Все описанные выше тенденции развития телекоммуникаций активно реализуются в настоящее время с внедрением:

- волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и систем передачи, имеющих реальную пропускную способность при передаче цифровых сигналов в несколько сотен гигабит в секунду в одном волокне;
- цифровых систем коммуникации и распределения трафика с использованием технологий коммутации каналов и коммутации пакетов. Число абонентских линий в цифровых коммутационных станциях достигает 200–300 тысяч;
- систем кабельного телевидения с числом телевизионных программ до 100 и доступом в Интернет со скоростью до 1 Гбит/с;
- систем IP-телефонии с пакетной передачей речи в IP-сетях, в которых себестоимость услуги междугородной и международной телефонии снижается в несколько (3–5) раз без заметного ухудшения качества;
- сотовых систем связи и многих других достижений.



Выводы

В настоящее время телекоммуникационные системы развиваются по пути цифровизации и интеграции.

Скорости передачи информации могут изменяться от единиц бит/сек. до десятков Гбит/сек.

Телекоммуникационные системы должны работать круглосуточно, что предъявляет высокие требования к их надежности.

Соглашения, принятые в книге

Для улучшения восприятия материала в данной книге используются пиктограммы и специальное выделение важной информации.

Эта пиктограмма означает определение или новое понятие.

Эта пиктограмма означает внимание. Здесь выделена важная информация, требующая акцента на ней. Автор здесь может поделиться с читателем опытом, чтобы помочь избежать некоторых ошибок.

Выводы

Эта пиктограмма означает выводы. Здесь автор подводит итоги, обобщает изложенный материал или проводит анализ.

Контрольные вопросы по главе

Глава 1

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (ТС)

1.1 Каналы, тракты, системы и сети передачи информации

ТС предназначены для передачи информации [1, 2]. Для начала сформулируем некоторые определения:

Информация — совокупность сведений, данных, знаний о каких-либо процессах, явлениях, объектах и т. п., способных храниться, передаваться и преобразовываться для деятельности человека.

Носителем информации является сообщение, которое, в свою очередь, преобразуется в первичный электрический сигнал $U(t)$. Передача сообщения схематично представлена на рис. 1.1, где $S(t)$ — электрический сигнал, удобный для передачи по линии связи, а $n(t)$ — помехи и шумы.

Линия передачи — физическая среда распространения электромагнитных волн, несущих сообщение. После прохождения линии передачи сигнал испытывает обратное преобразование. В качестве линии передачи используются разные виды кабелей. На сегодняшний день одними из самых популярных являются витая пара и оптоволокно. Также довольно широко используются радиорелейные и спутниковые линии связи.

Канал передачи начинается и оканчивается у абонентов, но не включает в себя оконечные терминальные устройства.

Система передачи — канал передачи вместе с оконечными устройствами.

Рассмотренный канал передачи является двухточечным и односторонним, т. е. передача сообщений осуществляется в одну сторону.

Если источник и приемник поочередно меняются местами, то для обмена сигналами необходимо использовать двухсторонний канал связи, допускающий передачу как в одну, так и в другую сторону. Наиболее же эффективный способ передачи —

это организация двух встречных каналов, работающих одновременно. Такой спаренный канал называется дуплексным.

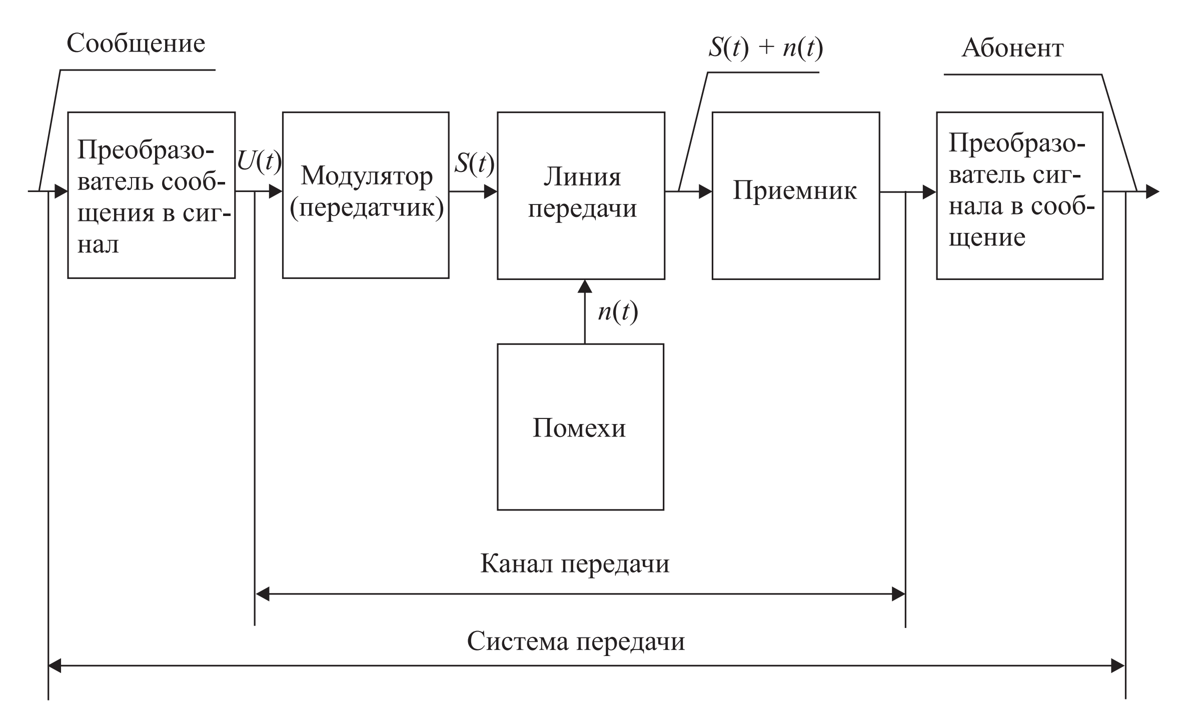
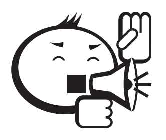


Рис. 1.1 – Структурная схема системы передачи

Компромиссный вариант — полудуплексный режим: для достижения двухсторонней передачи используется один канал, два приемника и два передатчика, включаемые попеременно.

Обычно на практике используются многоканальные системы передачи (МСП). С их помощью мы можем передавать несколько сообщений одновременно по одному каналу. На рис. 1.2 представлена обобщенная структурная схема МСП.

В МСП первичные сигналы, поступающие от абонента, преобразуются модуляторами ($М_i$). Полученные сигналы называются канальными сигналами. УОК объединяет канальные сигналы в так называемый групповой сигнал.



В настоящее время в телекоммуникационных системах используют частотное разделение каналов (ЧРК), временное (ВРК) и кодовое (КРК).

При ЧРК каждому каналу соответствует своя полоса частот Δf_i (рис. 1.3). Обычно все Δf_i равны, хотя может быть и не так. Все канальные сигналы в группе генерируются одновременно. Для того чтобы подчеркнуть, что форма спектра канальных сигналов несимметрична и при объединении и разделении каналов спектр может быть инвертирован (зеркально отражен относительно f_i), на рисунке 1.3 они изображены в виде «пилообразных треугольников». Роль преобразующих устройств в системе с ЧРК играют преобразователи частоты (смесители), а в качестве УОК применяются сумматор и передатчик (усилитель мощности). В качестве УРК ис-

пользуется система полосовых фильтров, настроенных на f_i. Выделенные канальные сигналы преобразуются в первичные с помощью детекторов.

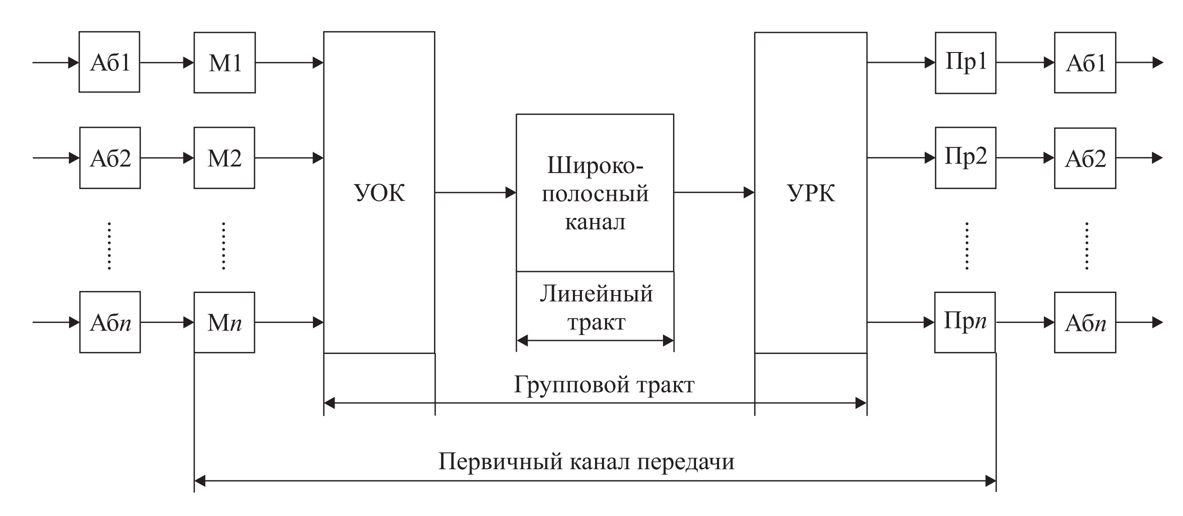


Рис. 1.2 – Многоканальная система передачи
$Аб_i$ — абонент; $М_i$ — преобразующие устройства (модуляторы);
УОК — устройство объединения каналов; УРК — устройство разделения каналов;
$Пр_i$ — преобразующие устройства (демодуляторы)

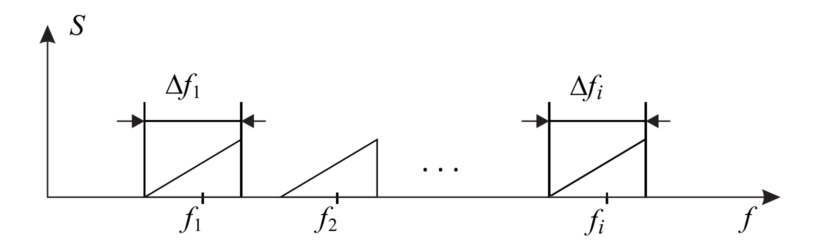


Рис. 1.3 – Частотное разделение каналов

При ВРК из первичных сигналов делаются дискретные выборки с шагом дискретизации $\tau_д$. Моменты дискретизации для соседних первичных сигналов сдвинуты на время $\tau_к$. При этом за время $\tau_д$ можно передать $N = \tau_д/\tau_к$ дискретных сигналов (рис. 1.4).

Здесь все сигналы группы передаются в одной полосе частот, но в разные моменты времени. Устройствами объединения и разделения каналов в этом случае будут соответственно мультиплексор и демультиплексор.

При КРК все первичные сигналы преобразуются в цифровой код и символы этого кода передаются одновременно и в одной и той же полосе частот. Различение первичных сигналов осуществляется за счет внутреннего кодирования каждого символа (рис. 1.5) с помощью специального кодера. На приемном конце каждому каналу соответствует свой коррелятор или согласованный фильтр.

Поскольку база такого сигнала B (число импульсов внутри символа) должна быть большой, порядка 100, то спектр сигнала при сохранении скорости передачи расширяется в B раз. Поэтому сигналы при КРК называют также широкополосными или шумоподобными.

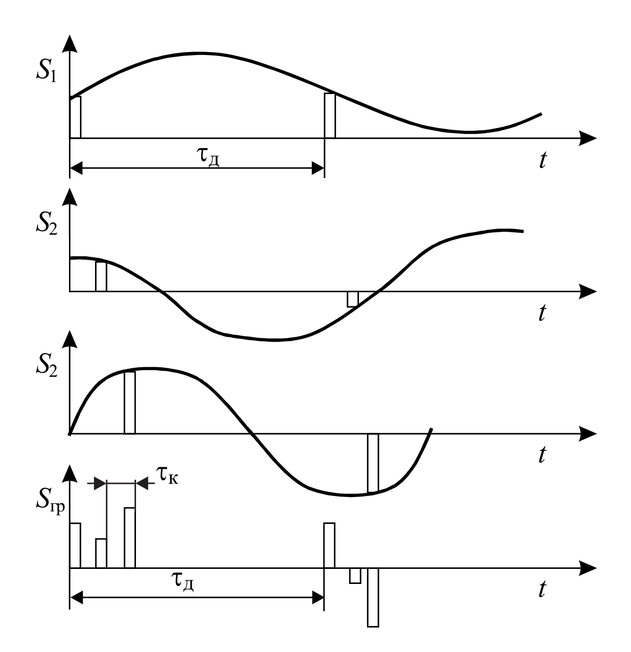


Рис. 1.4 – Временное разделение каналов

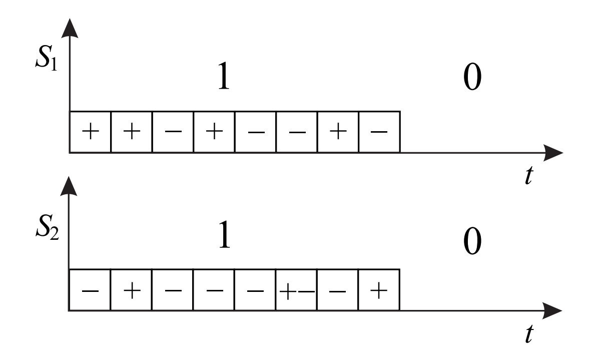


Рис. 1.5 – Кодовое разделение каналов



Рассмотрим процедуру обмена данными между абонентами.

Информацию нужно не только передавать, но и распределять. Система, распределяющая информацию, называется сетью связи, или сетью передачи информации.

На рис. 1.6 показаны примеры сетей с постоянными соединениями (некоммутируемые сети). Все эти сети непригодны для большого числа пользователей, так как имеют следующие недостатки:

- связь во всей сети с общей шиной нарушается с обрывом «шинного» кабеля в любом месте;
- при соединении «звезда» слабым местом является центр коммутации;
- соединение «кольцо» трудно осуществить для большого числа узлов из-за трудностей с прокладкой кабеля;
- полносвязная сеть достаточно дорога, т. к. требует много межсоединений.

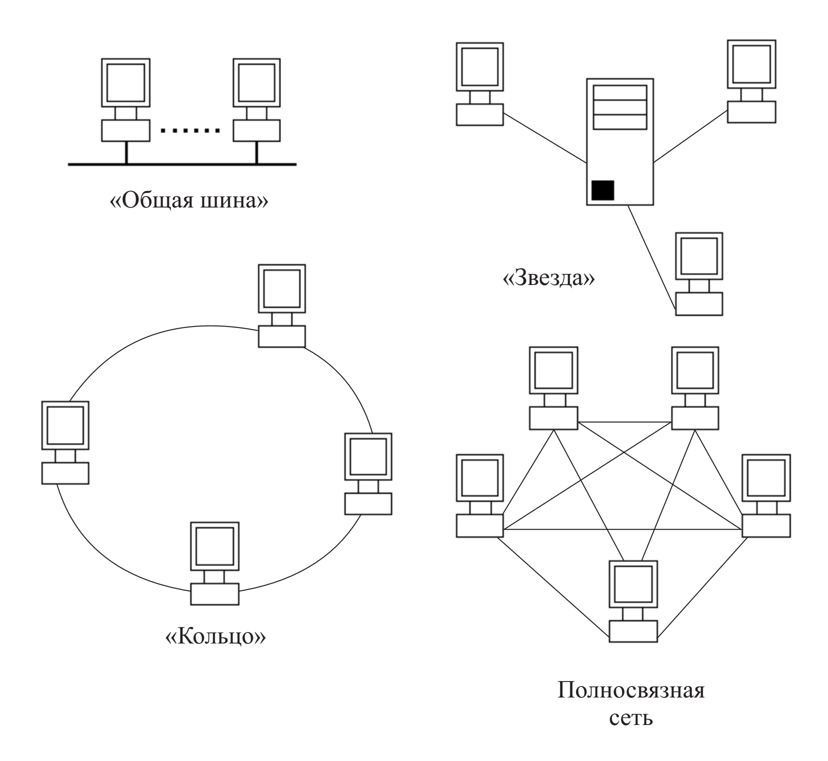


Рис. 1.6 – Примеры некоммутируемых сетей

Поэтому обычно используют системы с временными соединениями (на время связи) через узлы коммутации. Узлы коммутации связаны соединительными линиями с высокой пропускной способностью (рис. 1.7).

По запросу абонента некоторого УК методом переключения создают первичные каналы передачи между любыми абонентами каждого из узлов через соединительные линии.

Отличие такого соединения от группового тракта: в пределах группы передаваемых по соединительным линиям сообщений первичные каналы постоянно меняются.

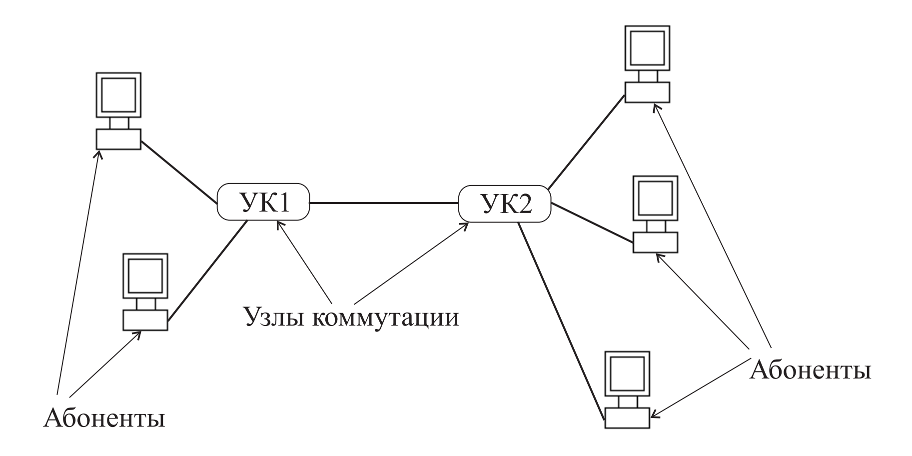


Рис. 1.7 – Соединение через узлы коммутации

1.2 Основные принципы построения телекоммуникационных сетей

Телекоммуникационные сети разделяются по следующим признакам [1]:

1.2.1 Функциональные признаки

а) *Сеть передачи* (транспортная сеть, первичная сеть) — основа для оказания и распределения услуг. В сеть передачи входят:

  – *системы передачи*;
  – *сетевые узлы* — комплексы технических и программных средств, которые образуют долговременные (некоммутируемые) соединения групповых трактов и каналов;
  – *сетевые станции* — сетевые узлы, в которых осуществляется распределение каналов и групповых трактов между вторичными сетями.

б) *Вторичные сети* — сети связи, коммутируемые и некоммутируемые, распределяющие информацию по службам и абонентам.

   Эти сети существуют на основе транспортных сетей и отличаются друг от друга способом распределения.

   Вторичные сети делятся:

  – на телефонные;
  – передачи данных;
  – телерадиовещания и т. п.

   Каждая вторичная сеть нацелена на конкретную услугу (конкретные виды сервиса). Но каждая служба и вторичная сеть могут предоставлять дополнительные услуги. Например, телефонная сеть — услуги Интернет, сеть передачи данных — услуги IP-телефонии.

в) *Служба электрической связи* — комплекс аппартно-программных средств, предоставляющий услуги связи. Службы — системы связи третьего уровня. Они представлены на рис. 1.8.

г) *Сети управления телекоммуникациями (TMN)*. Эти сети предназначены для решения следующих задач:

  – управление конфигурацией сети, что предполагает непосредственный и удаленный доступ администраторов сети к формированию и развитию ее структуры, подключению и отключению региональных операторов и других пользователей и развитие услуг связи;
  – управление неисправностями, предполагающее контроль состояния сети, обнаружение и локализацию неисправностей и их устранение, оповещение пользователей о проводимых работах;
  – управление качеством связи;
  – управление расчетами за услуги связи;

– управление безопасностью: защита от несанкционированного доступа в сеть на уровне баз данных и системы управления, соблюдение конфиденциальности при предоставлении данных.

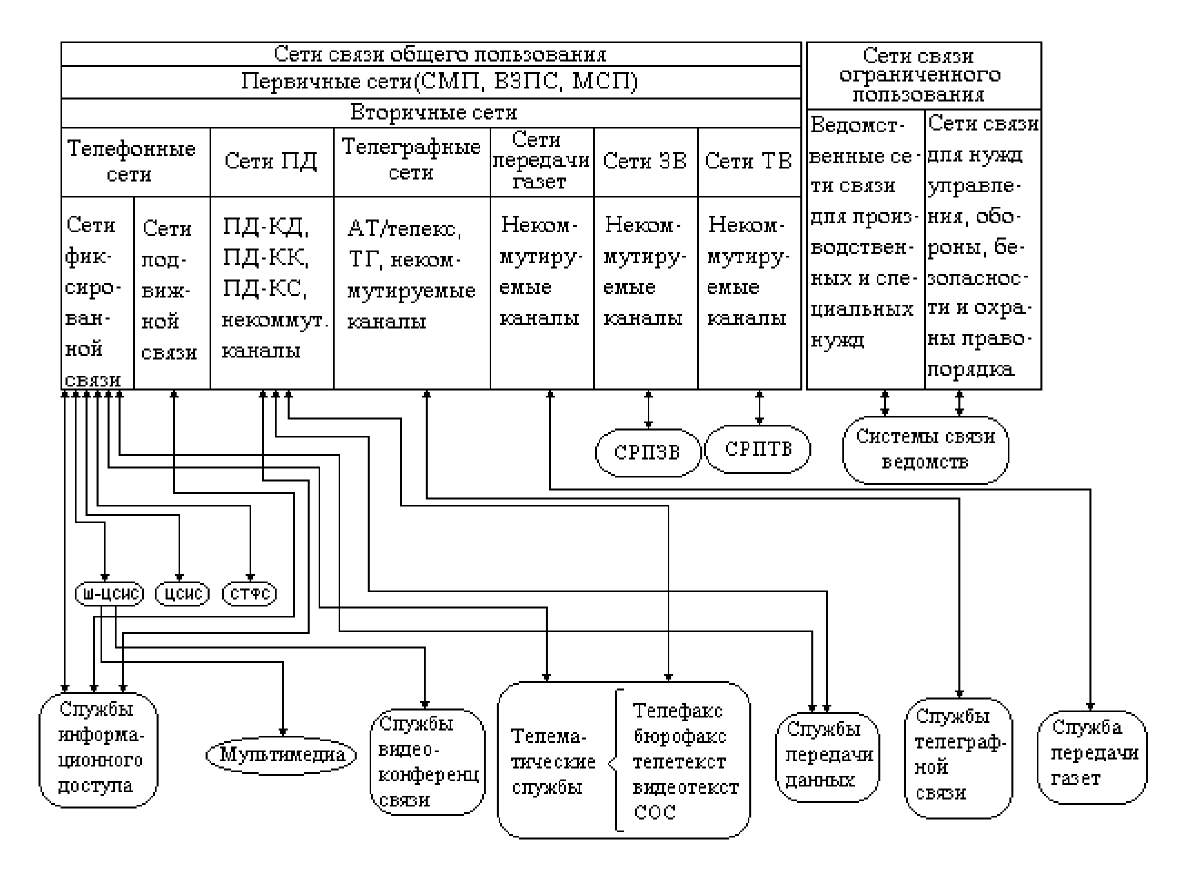


Рис. 1.8 – Функциональная структура Взаимоувязанной сети связи Российской Федерации: СМП — магистральная первичная сеть; ВзПС — внутризоновая первичная сеть; МСП — местная первичная сеть; ПД-КК — передача данных–коммутация каналов; ПД-КП — передача данных–коммутация пакетов; ПД-КС — передача данных–коммутация сообщений; АТ — абонентский телеграф; ЦСИС — цифровые сети с интеграцией служб; СТфС — система телефонной связи; СРПЗВ — система распределения передач звукового вещания; СРПТВ — система распределения передач телевизионного вещания; СОС — система обработки сообщений

TMN реализуются на базе существующих первичных и вторичных сетей в виде самостоятельной сети передачи данных (рис. 1.9). Здесь оператор с помощью рабочей станции, операционных систем и сети передачи данных может управлять как системами передачи, так и коммутационным оборудованием (АТС).

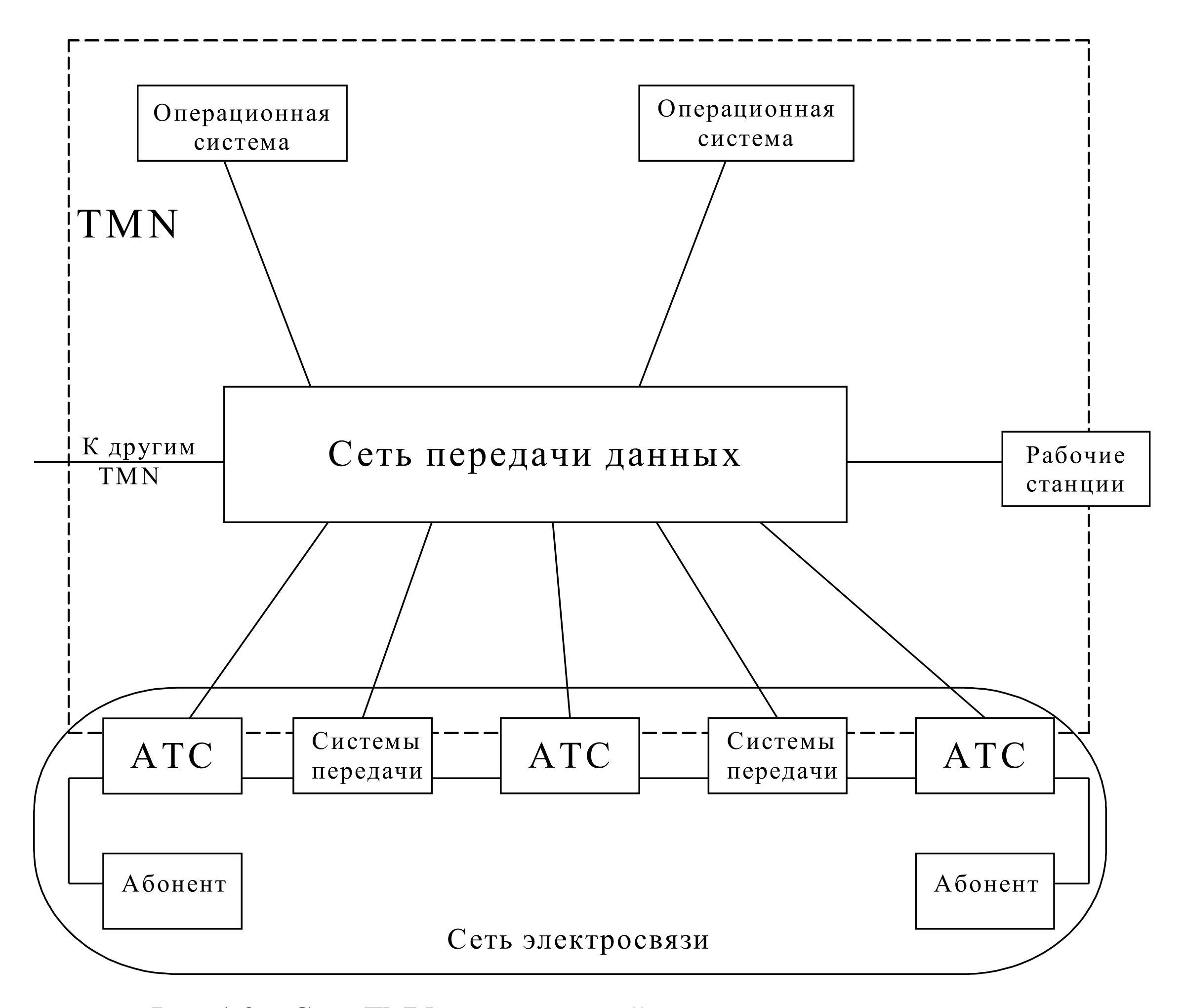


Рис. 1.9 – Сеть TMN и её взаимодействие с сетями электросвязи

1.2.2 Иерархические признаки (территориальные)

По степени охвата пользователей телекоммуникационные системы разделяются следующим образом:

Глобальные. Глобальные — охватывают весь мир или значительную его часть. Примерами глобальных сетей являются всемирная телефонная сеть общего пользования, сеть передачи данных Интернет, сотовая сеть стандарта GSM, спутниковые системы Инмарсат и др.

Сети отдельных государств. Эти сети охватывают территории отдельных государств и включают в себя всю совокупность телекоммуникационных систем: транспортные и вторичные сети, сети доступа и службы электросвязи, сети управления связью. Примером такой сети является Взаимоувязанная Сеть Связи Российской Федерации (ВСС РФ). ВСС РФ представляет собой сложный комплекс связанных между собой региональных сетей связи общего пользования и ведомственных сетей с общим централизованным управлением. В ВСС РФ не входят частные сети, а также внутрипроизводственные и технологические сети различных организаций.

Основой ВСС РФ является первичная (транспортная сеть), которая состоит из магистральной сети, соединяющей сетевые магистральные узлы, а также зоновых и местных (городских и сельских) сетей.

Зоновые первичные сети. Зоновые первичные сети — это сети областного, краевого или республиканского значения. Они распределяют телекоммуникационные потоки из магистральной сети к сетям отдельных городов и сельских районов.

На рис. 1.10 в качестве примера схематично показан участок магистрали Москва–Хабаровск. Сетевой магистральный узел находится в Новосибирске, сетевая станция — в г. Томске.

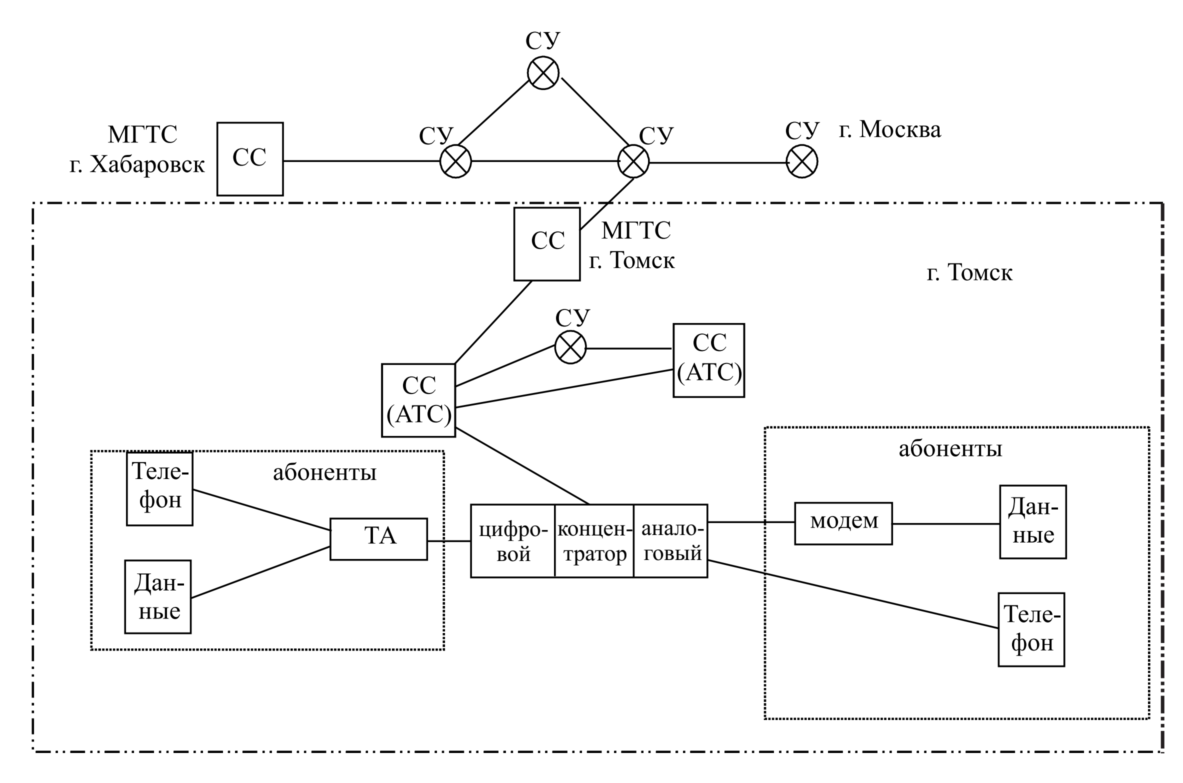


Рис. 1.10 – Участок магистрали Москва–Хабаровск (схематично):
ТА — терминальный адаптер

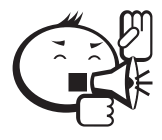
Выход городской сети города Томска к магистрали осуществляется через Междугороднюю Телефонную Станцию (МГТС). Соединение с магистралью осуществляется на сетевых узлах (СУ). Архитектура телефонной сети Томска имеет кольцевую структуру. Абоненты городской сети могут быть подключены непосредственно к одной из станций. А удаленные группы пользователей могут быть экономично включены в цифровую систему коммутации (ЦСК) с помощью выносных концентраторов, приближенных к месту группирования пользователей. Функционально концентраторы цифровой сети отличаются от аналоговых подстанций возможностью замыкать внутренние потоки информации без занятия коммутационного оборудования станций города и каналов, связывающих концентратор с ЦСК. Эти каналы используются только для внешней связи данной группы пользователей.

1.2.3 Стандартизация телекоммуникационных сетей и систем

Телекоммуникационные сети и системы являются сложными аппаратно-программными комплексами, распределенными на больших территориях и, как правило, состоящими из разнородных составляющих, т. е. включающими в себя оборудование и программное обеспечение различных производителей. Для успешного функционирования они должны быть состыкованы по своим входным и выходным параметрам, должны «понимать друг друга».

С этой целью разработано много стандартов как мирового, так и государственного уровня. В области телекоммуникаций и вычислительных сетей наиболее полный подход к разработке стандартов проявили две международные организации:

- Международная Организация по Стандартизации (МОС или ISO — International Standartization Organization);
- Международный Союз Электросвязи (МСЭ или ITU — International Telecommunication Union), ранее: Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии (МККТТ).



Эти и другие организации координируют свои усилия в области стандартов. Результатом этой координации явилась разработка эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) (рис. 1.11), содержащей семь уровней или слоев [2].

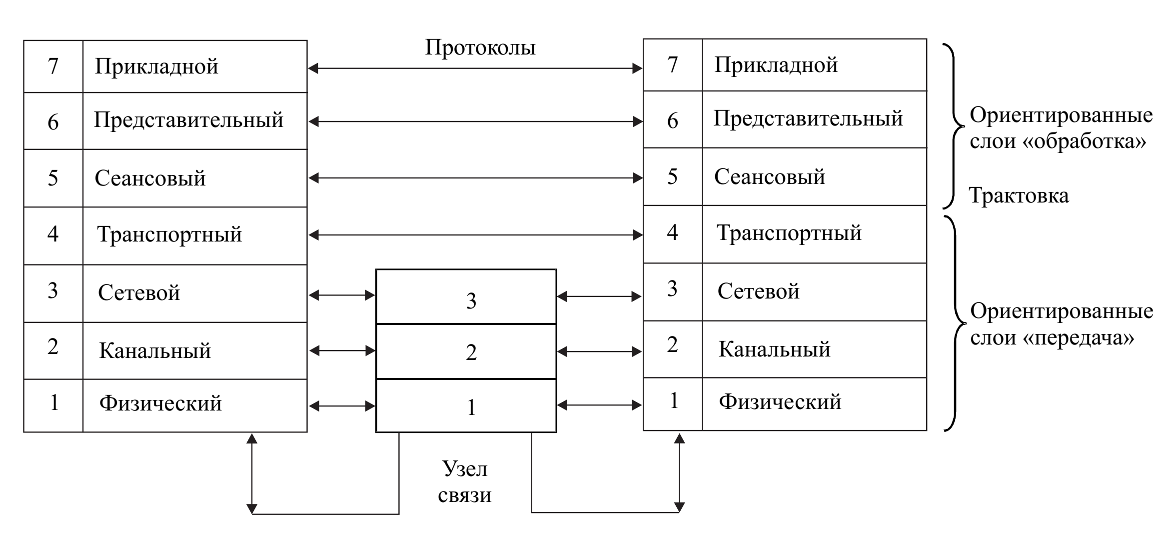


Рис. 1.11 – Эталонная модель ВОС:
слои 1 и 2 обеспечивают одно единственное соединение; слой 3 избирает соединение (выбирает маршрут); слой 4 избирает пользователя; слои 5–7 относятся к пользователю и его прикладным процессам

В приведенной схеме учитывается, что компьютеры могут иметь различные операционные системы (например, PC и большая многотерминальная система).

Следовательно, интерфейс между программой пользователя (прикладным процессом) и низлежащими службами связи может быть различным.

В рамках данного учебного пособия наибольший интерес представляют нижние 3 уровня. Отметим наиболее существенные их свойства. Физический уровень задает взаимодействие со средой передачи, и в том числе тип линии связи, скорость передачи, волновое сопротивление, амплитуду и мощность сигнала, длительность импульса, законы кодирования и модуляции и т. д. Основное назначение канального уровня — передача сигнала по существующему каналу связи в режиме «точка-точка». Например, при телефонной связи эта процедура составляет последовательность снятия трубки, ответ станции или набор номера, ответ абонента. При поиске в сети Интернет эта процедура представляет собой набор IP адреса и ответ поисковой системы. Основная функция сетевого уровня — организация сквозного канала в распределенной системе, состоящей из множества узлов (прокладка маршрута).

Таблица 1.1 – Функции, выполняемые уровнями

7	Прикладной	Интерфейс с прикладными программами. Передача, доступ и управление формами. Обмен сообщениями и документами (например, электронная почта). Передача и манипулирование задачами
6	Представительный	Взаимная конверсия различных синтаксисов. Разработано несколько форм абстрактного синтаксиса данных для их использования совместно с синтаксисом передачи (конкретным синтаксисом) прикладными элементами. Формирование данных (коды, алфавит, графика)
5	Сеансовый	Организация и проведение сеансов взаимодействия между прикладными процессами
4	Транспортный	Сквозной через КС (коммуникационную систему) обмен данными между системами. Управление соединением, управление ошибками, фрагментация, управление потоком, сетевой сервис
3	Сетевой	Сетевая маршрутизация, адресация, установление и освобождение вызовов. Обнаружение ошибок в физических средствах соединения. Сегментирование и объединение блоков данных
2	Канальный	Установление и подтверждение соединений. Управление каналами (кадрирование, прозрачность данных). Управление ошибками в каналах (проверка четности или контрольных сумм)
1	Физический	Обеспечение физического и механического интерфейсов сети. Протоколы модуляции и линейного кодирования

В качестве примера рассмотрим протокольный стек глобальной сети общего пользования стандарта TCP/IP (рис. 1.12).

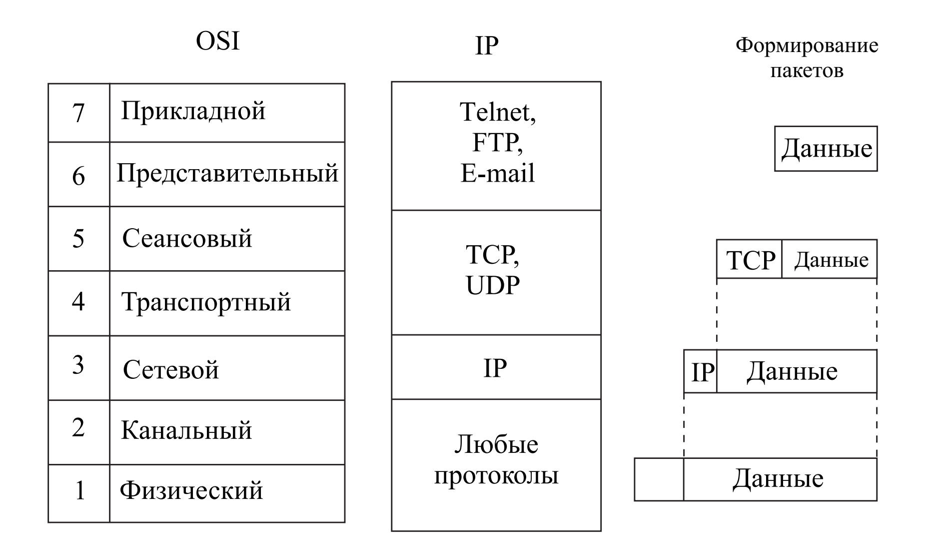


Рис. 1.12 – Стек протоколов TCP/IP

В стеке TCP/IP используются следующие протоколы:

1) Telnet — протокол эмуляции терминала;
2) FTP — протокол передачи файлов;
3) TCP — протокол управления передачей, обеспечивает сервис надежной доставки информации;
4) UDP — пользовательский дейтаграмный протокол, обеспечивает негарантированную доставку пакетов без установления соединения между клиентами, но с большей скоростью, чем протокол TCP;
5) IP межсетевой протокол, обеспечивает доставку через узлы.

Как видим, в конкретном стеке протоколов функции некоторых уровней объединены и их число не равно 7. TCP/IP начинает работать только с третьего уровня. При переходе информации с уровня на уровень она снабжается дополнительным заголовком, несущим служебную информацию.

Покажем структуру заголовка IP — дейтаграммы (в битах):

<table>
<tr><td>Версия проток. 4</td><td>Длина загол. 4</td><td>Тип сервиса 8</td><td colspan="2">Общая длина дейтаграммы 16</td></tr>
<tr><td colspan="3">Идентификатор накл. 16</td><td>Флаг 3</td><td>Смещение фрагм. 13</td></tr>
<tr><td colspan="2">Время жизни 8</td><td>Протокол верх. уровня 8</td><td colspan="2">Контрольная сумма 16</td></tr>
<tr><td colspan="5">Адрес источника 32</td></tr>
<tr><td colspan="5">Адрес назначения 32</td></tr>
<tr><td colspan="5">Резерв</td></tr>
<tr><td colspan="5">Данные</td></tr>
</table>

«Тип сервиса» включает в себя: приоритеты, задержку, пропускную способность, надежность. Длина пакета может изменяться (до 2^{16}), поэтому она указывается в поле «Общая длина» для облегчения обработки. «Идентификатор» — указывает номер пакета в группе. «Смещение пакета» — эта операция необходима

при формировании из пакетов исходного сообщения. «Время жизни» необходимо для разгрузки коммутационного оборудования. Если пакет не дошел до адресата и «завис» в буфере узла коммутации, то по истечении времени, указанном в соответствующем поле кадра, он просто стирается. Протокол верхнего уровня — TCP или UDP.



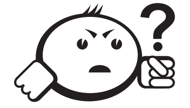
Выводы

Телекоммуникационные системы включают в себя подсистемы передачи информации и распределения информации.

Системы распределения информации могут быть как с постоянными связями (шина, звезда и т. д.), так и с переменными связями (коммутаторы).

При стандартизации телекоммуникационных систем используется семиуровневая модель взаимодействия открытых систем. В рамках данного курса наиболее важными являются следующие уровни:

- физический, который определяет интерфейс взаимодействия оконечных приборов с линиями связи;
- канальный, который определяет организацию передачи информации между двумя абонентами по созданному каналу связи;
- сетевой, основная функция которого организация канала передачи (организация маршрута через множество узлов телекоммуникационной сети).



Контрольные вопросы по главе 1

1. Дайте сравнительную характеристику методов ЧРК и ВРК.
2. Назовите основные свойства физического уровня.
3. Назовите основные свойства канального уровня.
4. Назовите основные свойства сетевого уровня.

Глава 2

СИГНАЛЫ И КАНАЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

2.1 Сигналы электросвязи

2.1.1 Энергетические характеристики сигналов

К энергетическим характеристикам сигналов относятся абсолютные характеристики: мощность P, напряжение U, ток I и их уровни передачи (логарифмические характеристики) $p_{\text{м}}$, p_u, p_I. Для измерения мощности чаще всего используются уровни передачи по мощности, измеряемые в децибелах по мощности:

$$p_{\text{м}} = 10\lg\frac{P}{P_0}, \tag{2.1}$$

где P_0 — отсчетное значение P, начало отсчета.

Аналогично для напряжения и тока:

$$p_u = 20\lg\frac{U}{U_0}. \tag{2.2}$$

Измерения мощности характеризуются:

- средним значением

$$P_{\text{ср}} = \frac{\overline{U}^2}{R} = \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int\limits_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}\frac{U_2}{R}\,dt, \tag{2.3}$$

  где R — сопротивление нагрузки, T — интервал усреднения;

- максимальным значением $P_{\max}$. Поскольку электрический сигнал — это случайный сигнал, то для определения максимального значения вводится понятие $P_{\max}$ — мощность гармонического сигнала с амплитудой U_m, кото-

рая превышает мгновенное значение переменной составляющей исследуемого сигнала с определенной достаточно малой вероятностью — ε(ε = = $10^{-2}, \ldots, 10^{-5}$);

- минимальной мощностью $P_{\min}$. Чаще всего за $P_{\min}$ берут значение среднеквадратической ошибки при приеме сигнала. Эта величина определяется помехой, так что

$$P_{\min} \approx P_{\text{пом}}. \qquad (2.4)$$

Наряду с прямыми характеристиками мощности часто используют их производные:

- пик-фактор

$$\Pi = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}; \qquad (2.5)$$

- динамический диапазон

$$Д = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}}; \qquad (2.6)$$

- защищенность сигнала

$$A_{з} = 10 \lg \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\min}}. \qquad (2.7)$$

Защищенность $A_з$ определяет уровень отношения сигнал-помеха.

2.1.2 Временные и спектральные характеристики первичных сигналов электросвязи

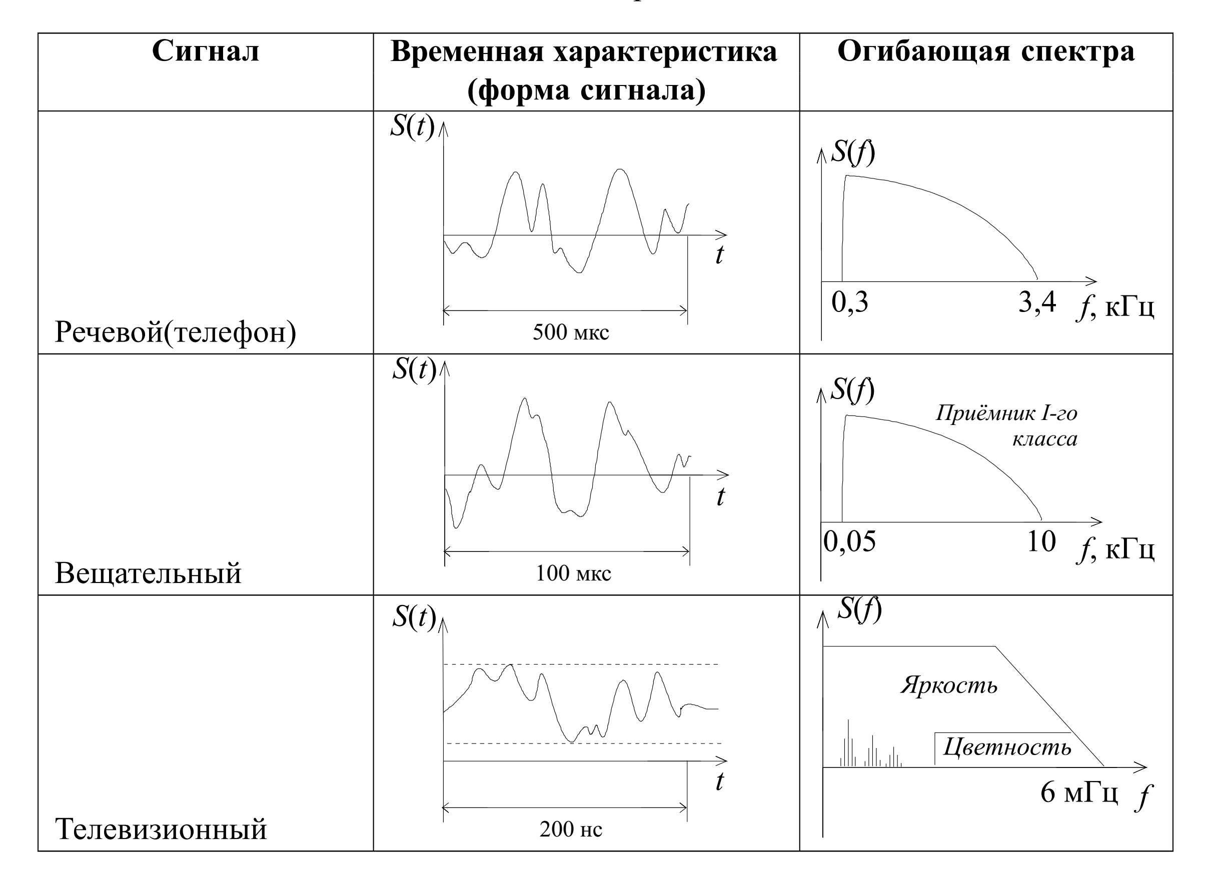
Временные и спектральные характеристики первичных сигналов электросвязи связаны с его формой [1]. Для основных типов сигналов электросвязи они приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Временные и спектральные характеристики первичных сигналов электросвязи

Сигнал	**Временная характеристика (форма сигнала)**	**Огибающая спектра**
Телеграфный	$S(t)$, t, 20 мс	$S(f)$, 75, f, Гц
Факс	$S(t)$, t, 1 мс	$S(f)$, n=60 об/мин, n=90, n=120, 702, 1100, 1464, f, Гц

продолжение на следующей странице

Таблица 2.1 – Продолжение



Сигнал	Временная характеристика (форма сигнала)	Огибающая спектра
Речевой(телефон)	$S(t)$, t, 500 мкс	$S(f)$, 0,3, 3,4, f, кГц
Вещательный	$S(t)$, t, 100 мкс	$S(f)$, *Приёмник I-го класса*, 0,05, 10, f, кГц
Телевизионный	$S(t)$, t, 200 нс	$S(f)$, *Яркость*, *Цветность*, 6 мГц, f

Часто вместо временных и спектральных характеристик используют параметры сигналов: длительность T_c и ширина спектра ΔF_C.

2.1.3 Параметры сигнала с точки зрения его передачи по каналу связи

Основными параметрами аналогового сигнала с точки зрения его передачи по каналу связи являются [1]:

- длительность сигнала T_c;
- ширина спектра ΔF_c;
- динамический диапазон $Д_c$.

Длительность сигнала T_c определяет интервал времени, в течение которого существует сигнал.

Ширина спектра ΔF_c характеризует скорость изменения сигнала внутри интервала существования.

Для общей характеристики аналогового сигнала вводят физический «объем» сигнала V_c:

$$V_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot Д_c.$$

Для описания канала связи также можно использовать три характеристики:

- время действия канала $T_к$;
- полосу пропускания канала $\Delta F_к$;

- динамический диапазон $Д_к$, зависящий от чувствительности (P_{min}) и от максимальных нагрузок (P_{max});

тогда емкость канала $V_к$:

$$V_к = T_к \cdot \Delta F_к \cdot Д_к.$$

Необходимое условие передачи сигнала очевидно — $V_c < V_к$. В простейшем случае

$$T_c < T_к, \quad \Delta F_c < \Delta F_к, \quad Д_c < Д_к.$$

Геометрическая интерпретация объектов информации сигнала и канала и преобразование при модуляции даны на рис. 2.1.

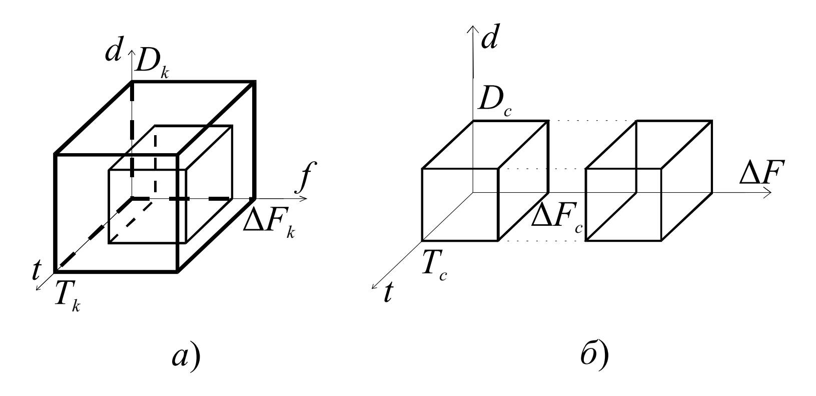


Рис. 2.1 – Геометрические образы:
а) согласование объемов сигнала и канала связи;
б) преобразования основных характеристик сигнала

Для общей характеристики цифровых сигналов вместо физического «объема» применяют количество информации $I_ц$.

Цифровым сигналом называется дискретная во времени случайная комбинация двух и более (2, 4, 8,. . .) разрешенных уровней l.

Дискретизация во времени осуществляется с тактовым интервалом T_T и соответственно с тактовой частотой

$$F_T = \frac{1}{T_T}.$$

Количество информации цифрового сигнала $I_ц$ определяется следующим образом:

$$I_ц = F_T \cdot \log_2 l \text{ (бит)}.$$

Здесь F_T — тактовая частота, l — число разрешенных уровней (например, 2 — «0» и «1»).

Чтобы оценить информационное содержание аналогового сигнала, следует учитывать два обстоятельства:

1. Тактовая частота в два раза больше максимальной частоты сигнала F_m (согласно теореме Котельникова):

$$F_T = 2 \cdot F_m.$$

2. Количество разрешенных уровней зависит от отношения мощности сигнала $P_с$ к средней мощности шума $P_ш$.

$$l = \sqrt{1 + \frac{P_с}{P_ш}} = \sqrt{\frac{P_с + P_ш}{P_ш}}.$$

Тогда количество информации в аналоговом сигнале, условно преобразованном в цифровой, будет

$$I_A = 2 \cdot F_m \cdot \frac{1}{2} \cdot \log_2\left(1 + \frac{P_c}{P_ш}\right) = F_m \cdot \log_2\left(1 + \frac{P_c}{P_ш}\right).$$

2.1.4 Сравнительная характеристика сигналов электросвязи

Сигнал	Полоса, Гц	Динамический диапазон, дБ	Количество информации, бит
Телеграф	75	—	75
Факс офисный	$f_{120} = 1465$ $f_{90} = 1100$ $f_{60} = 732$	25	11700 1464
Факс скоростной	$f_{рис} = 18 \cdot 10^4$	35	36000
Речь (телефон)	$f_{min} = 300$ $f_{max} = 3400$	$35 \div 40$	8000
Вещание	$15 \div 20000$ $30 \div 15000$ $50 \div 10000$	$25 \div 60$	160000
Телевизионный	$6 \cdot 10^6$	40	$80 \cdot 10^6$

2.2 Двусторонняя передача

2.2.1 Двусторонняя передача с 4 проводным окончанием

Два встречных канала одностороннего действия образуют 4 проводную линию (см. рис. 2.2). Здесь и далее размерность уровней в дБм0 означает, что абсолютное значение уровня на входе (выходе) отсчитано относительно точки нулевого относительного уровня (ТНОУ). Чаще всего в электросвязи в этой точке номинальное значение мощности равно 1 мВт.

В телефонии на соединительных линиях (между АТС) часто используется такая 4 проводная линия.

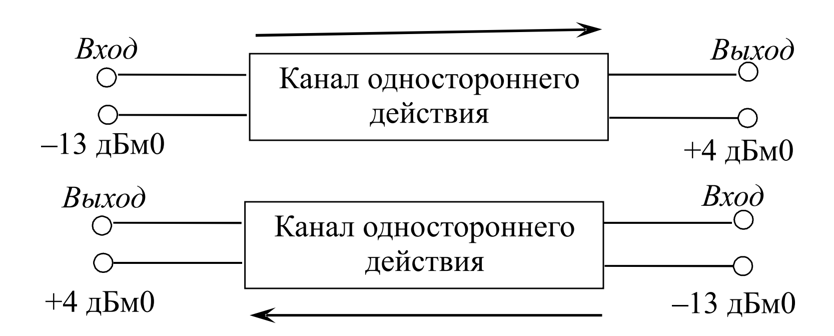


Рис. 2.2 – Четырехпроводная линия

2.2.2 Двусторонняя передача с 2 проводным окончанием

Такой вид передачи является самым простым и дешевым. Он в массовом порядке используется в абонентских телефонных линиях. Передача сигнала осуществляется по паре проводов, которые протянуты от абонента до АТС. В такой линии передачи нет никаких активных однонаправленных устройств (усилителей). Поэтому в такой системе возможна передача сигналов в обоих направлениях. При этом разговор или передача данных должны вестись во времени поочередно.

Напротив, при передаче сигналов между АТС (особенно на междугородних линиях) необходимо применение раздельных каналов для двусторонней связи (см. предыдущий раздел). В точке стыка (на АТС) двухпроводная и четырехпроводная линии должны быть согласованы.

В качестве примера можно рассмотреть канал тональной частоты (ТЧ) (см. рис. 2.3), который согласует 2 проводную линию (Абонент) и 4 проводную линию (АТС).

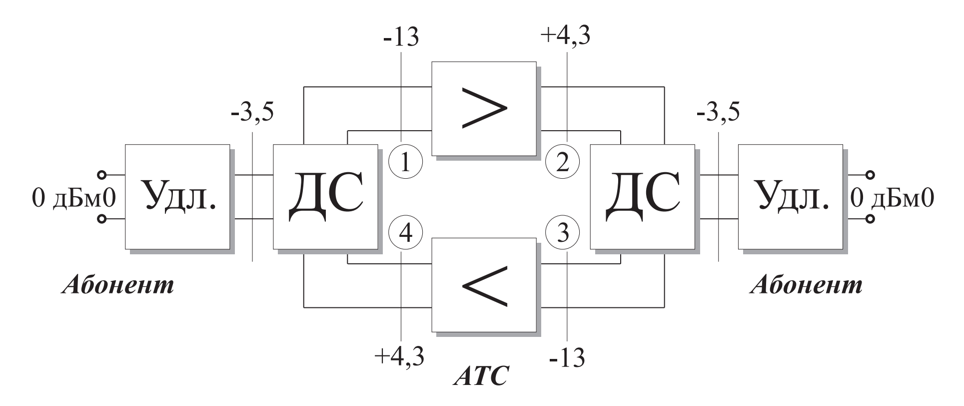


Рис. 2.3 – Канал тональной частоты: Удл. — удлинитель;
ДС — дифференциальная система; > — усилитель

Обратим внимание, что от АТС к абоненту идет 2 провода, а от АТС к другой АТС идут 4 провода (2 на передачу, 2 на прием), таким образом, ДС осуществляет согласование 2-проводного окончания с 4-проводным. При этом реализуется режим экономии медного провода на участке абонент-АТС.

В этой системе есть петля обратной связи, которая характеризуется $\alpha_{OC} = -(\alpha_{12} + \alpha_{34}) + (\alpha_{41} + \alpha_{23})$ запасом устойчивости, где α_{ij} — переходные затухания соответствующих участков. Рассмотрим эту величину:

$$\alpha_{OC} = 20 \cdot \lg \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = 20 \cdot \lg \dot{K}_{OC}, \qquad \dot{K}_{OC} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{\dot{K}_O}{1 - \dot{K}_O \cdot \dot{\beta}}, \ \dot{K} = |K(\omega)| \cdot e^{i \cdot \varphi(\omega)},$$

где α_{OC} — постоянная составляющая затухания, $\Delta\alpha_{OC}$ — переменная составляющая затухания ($\Delta\alpha_{OC} \leqslant 0{,}6$ дБ).

На рис. 2.4 изображена зависимость величины затухания от частоты. Из рисунка видно, что график имеет периодическую зависимость, которая объясняется прохождением частотных составляющих сигнала через усилители и дифференциальные системы с различными фазовыми сдвигами. В точках, где α минимально, наиболее вероятна возможность паразитного самовозбуждения.

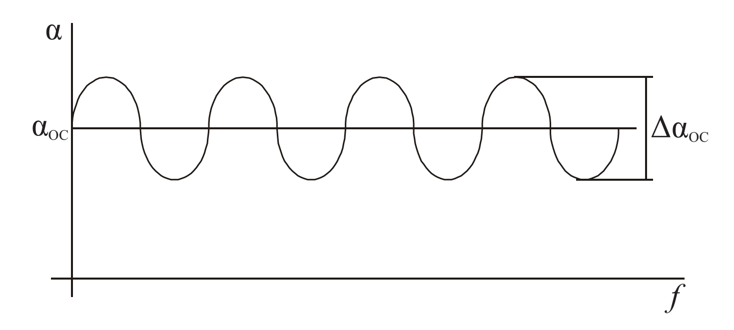


Рис. 2.4 – Частотная зависимость затухания (согласование двухпроводного и четырехпроводного окончаний)

В качестве развязывающих устройств в телефонных системах используют дифференциальные системы (рис. 2.5).

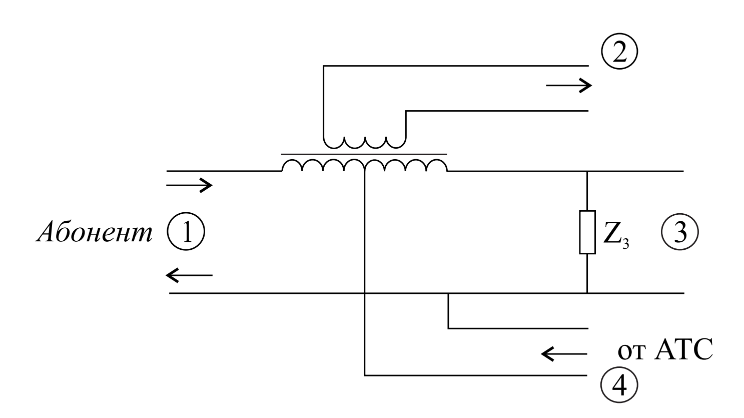


Рис. 2.5 – Дифференциальная система

Рассмотрим эффект развязки при прохождении сигнала от АТС к абоненту. На первичной обмотке трансформатора относительно средней точки возникают напряжения противоположной полярности. Во вторичной обмотке эти напряжения наводят ЭДС разного знака, которые компенсируют друг друга. Сигнал к приемнику АТС не проходит. В соответствии с рис. 2.3 подавление на этом участке должно быть не менее 17,3 дБ. Для устранения отражения от выхода 3 его нагружают сопротивлением Z_3, согласованным с линией. Таким образом, входы 2 и 4 оказались развязанными. Аналогично доказывается развязка выходов 1 и 3. Удлинитель

в канале ТЧ вместе с абонентской линией обеспечивает необходимое затухание — 3,5 дБ, которое нужно для подавления «эхо-сигналов» и эффектов обратной связи. Все дело в том, что абонентские линии, подключенные к дифсистеме, могут иметь существенный разброс по входному сопротивлению. При этом в контуре обратной связи за счет рассогласования возникают большие колебания α. Для их сглаживания и служит удлинитель.

2.3 Каналы связи

Каналом передачи называется последовательное включение каналообразующего оборудования и линии связи. К каналообразующему оборудованию относятся модемы, передатчики и приемники, мультиплексоры и другие устройства. Различают аналоговые и цифровые каналы передачи по типу передаваемых сигналов [1, 2].

Основные характеристики аналоговых сигналов точно такие же как и характеристики четырехполюсников:

- входное сопротивление и коэффициент отражения;
- уровни сигналов на входе и выходе, остаточное затухание;
- частотная характеристика затухания, верхняя и нижняя частоты полосы пропускания;
- нелинейные искажения;
- помехозащищенность.

К важнейшим характеристикам цифровых каналов относятся:

- пропускная способность;
- помехозащищенность;
- полоса частот.

Как правило, в системах связи используются типовые каналы, в которых основные параметры и характеристики нормализованы.

Нормализованное число типовых каналов образуют групповые тракты, которые могут быть аналоговыми или цифровыми.

Рассмотрим далее основные типовые каналы и тракты.

2.3.1 Аналоговые типовые каналы

1. ***Канал тональной частоты (ТЧ)*** является основным в аналоговой телефонии. Он сосредоточен в частотном диапазоне 0,3–3,4 кГц. Входное и выходное сопротивления равны 600 Ом.

Измерительные уровни КТЧ приведены на рис. 2.3 во всех характерных точках. На входе канала максимальная мощность составляет 1 мВт (точка нулевого относительного уровня — ТНОУ). Для среднестатистического абонента пик-фактор телефонного сигнала $\Pi = P_{\max}/P_{\text{ср}}$ составляет 15–16 дБ, поэтому средняя мощность сигнала — 32 мкВт.

Уровень мощности помехи в ТНОУ по нормам для самого протяженного канала на должен превышать значения — 40дБм, а защищенность канала $A_з = 25$ дБ.

Схема канала ТЧ изображена на рис. 2.3.

Общие сведения:

- Диапазон частот $\Delta f = 0{,}3 \div 3{,}4$ кГц;
- Затухание на краях полосы частот $\Delta\alpha = 8{,}7$ дБ;
- Входное сопротивление $R_0 = 600$ Ом.

Помехи в канале ТЧ:

- *Тепловой шум.*

  Уровень шума рассчитывается как

  $$P_{\text{ТШ}} = k \cdot T \cdot \Delta f,$$

  где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ ДЖ/град — коэффициент Больцмана, T — температура, Δf — полоса частот.
- *Дробовой шум (флуктуационный шум, возникает в активных элементах: усилителях и т. п.).*

  Коэффициент шума можно характеризовать как отношение мощностей сигнала и помехи на входе к их отношению на выходе:

  $$N = \frac{P_{\text{СВХ}}/P_{\text{ПВХСР}}}{P_{\text{СВЫХ}}/P_{\text{ПВЫХСР}}}.$$

  Он характеризует возрастание шума за счет активных элементов.
- *Межканальные помехи*, возникают за счет электрических наводок (рис. 2.6).

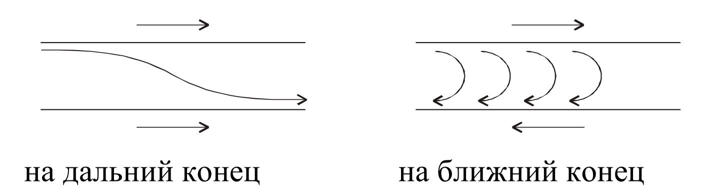


Рис. 2.6 – Межканальные помехи

При появлении сигнала в одной паре проводов в другой за счет электромагнитной связи возникает сигнал наводки. Этот сигнал распространяется как в прямом (помеха на дальний конец), так и в обратном (помеха на ближний конец) направлениях.

2. ***Аналоговые широкополосные каналы***. Эти каналы реализуются методом ЧРК путем группирования КТЧ:

- 3 канала ТЧ,
- 12 каналов ТЧ,
- 60 каналов ТЧ,
- 300 каналов ТЧ.

Формирование этих каналов будет рассмотрено в разделе 3. В настоящее время технология ЧРК в многопарных электрических кабелях практически вышла из применения.

3. ***Цифровые типовые каналы***:

- 64 кБит/с — основной цифровой канал,
- 2,048 Мбит/с — первичный канал (E1),
- 8,448 Мбит/с — вторичный канал (E2),
- 34,368 Мбит/с — троичный канал (E3),
- 139,264 Мбит/с — четверичный канал (E4),
- 155 Мбит/с — синхронный транспортный модуль STM-1,
- 622 Мбит/с — синхронный транспортный модуль STM-4,
- 2488 Мбит/с — синхронный транспортный модуль STM-16,
- 10 Гбит/с — синхронный транспортный модуль STM-64.

Их формирование рассматривается в разделе 4.

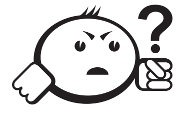


Спектры телекоммуникационных сигналов существенно различаются. Наименьшую ширину имеют спектры телефонного сигнала и факса, наиболее широкополосными являются телевизионные сигналы и сигналы передачи данных.

Количество информации, заключенное в сигналах, пропорционально ширине спектра. Наиболее информативными являются телевизионные сигналы и сигналы передачи данных.

Канал тональной частоты — это аналоговый канал, который связывает двух абонентов телефонной сети. Основными характеристиками канала являются: полоса пропускания (0,3–3,4 кГц) и волновое сопротивлении 600 Ом.

При передаче по магистральным линиям каналы объединяются, и в них ширина спектра и количество передаваемой информации существенно увеличиваются. Объединение каналов возможно как для аналоговых, так и цифровых сигналов.



Контрольные вопросы по главе 2

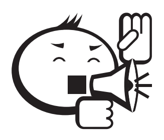
1. Чем отличаются единицы измерения ДБ и ДБМ?
2. Почему спектр телевизионного сигнала значительно шире, чем спектр телефонного?
3. Как можно увеличить информационную скорость, не изменяя физическую скорость?
4. Обоснуйте, почему в канале тональной частоты применяется двухпроводное абонентское окончание.

Глава 3

СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ (ЧРК)

Особенностью этих систем является то, что все каналы работают одновременно, каждый в своем диапазоне частот (рис. 1.3) [1]. ЧРК вначале было реализовано в системах на основе многопарных электрических кабелей. В настоящее время ЧРК используется в радиоканалах (цифровые радиорелейные линии, сотовая связь и т. д.) и в волоконно-оптических линиях связи.

3.1 Формирование канальных и групповых сигналов



Главное требование, применимое к системам ЧРК, заключается в минимизации ширины спектра при преобразовании сигнала. Для экономного использования частотного ресурса используют модуляцию с одной боковой полосой (ОБП) (см. рис. 3.1).

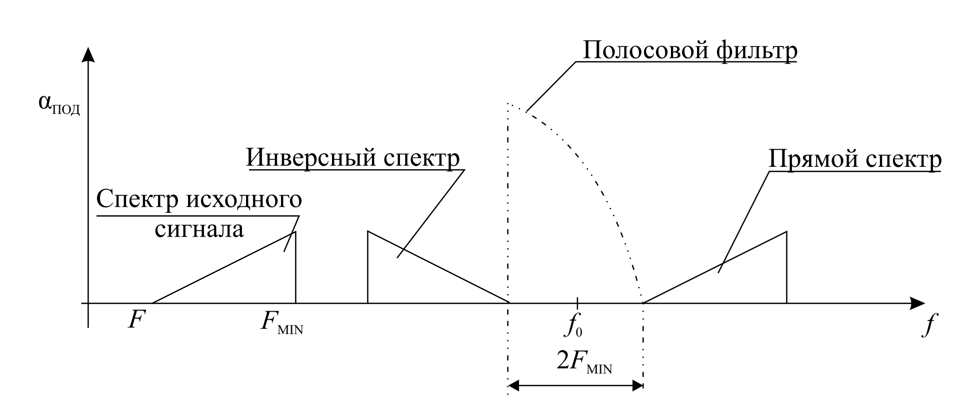


Рис. 3.1 – Формирование сигнала с одной боковой полосой

Крутизна скатов полосового фильтра равна $2F_{MIN}$.

Величина подавления боковых составляющих спектра $\alpha_{ПОД} = 65 \div 70$ дБ.

Эффективность фильтрации характеризуется полосой относительной расфильтровки $\delta = (2 \cdot F_{MIN})/f_0$, которая предъявляет требования к параметрам фильтров:

- LC фильтры: $\delta = 0{,}25 \div 0{,}03$.
- Кварцевые фильтры: $\delta \leqslant 0{,}005$.

Рассмотрим кварцевый фильтр.

При данных значениях для кварцевого фильтра, если $\delta = 0{,}005$, $2 \cdot F_{MIN} = 0{,}6$ кГЦ, $\Delta f = 4$ кГЦ, то $f_0 = 120$ кГЦ.

В полосе $0 \div 120$ кГц можно было бы организовать 30 каналов, но при учете условия «октавы» $f_{MAX}/f_{MIN} = 2$ (минимум нелинейных искажений по 2-й гармонике) получаем число каналов ТЧ, равное 12, а частотный диапазон ~ 60–108 кГц. Условие «октавы» состоит в том, что верхняя частота частотного диапазона не должна превышать нижнюю частоту более чем в 2 раза. Это условие исключает появление наиболее сильного нелинейного продукта — 2ой гармоники. Эта совокупность каналов ТЧ составляет первичную группу.

Способы формирования первичной группы:

1. *Способ формирования первичной группы — с использованием кварцевых фильтров (с однократным преобразованием частоты).* Здесь и далее частоты даны в кГц.

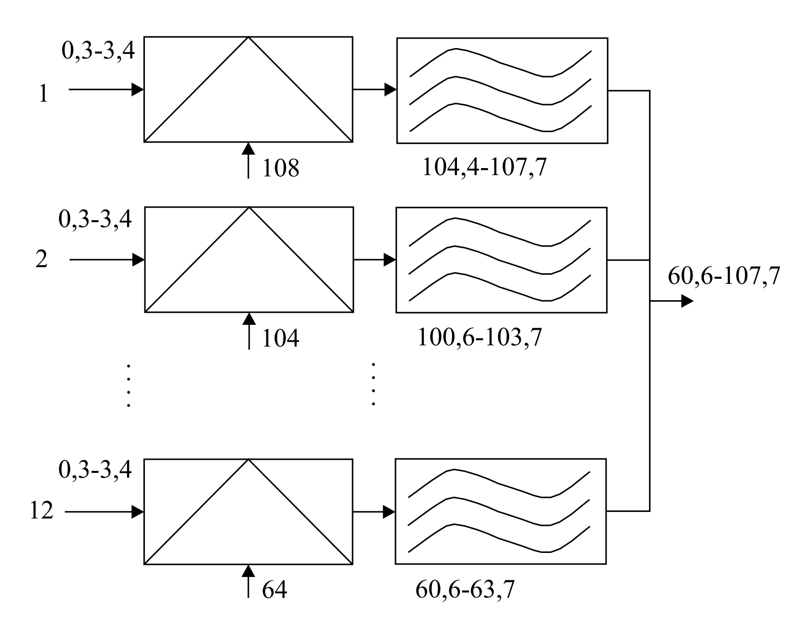
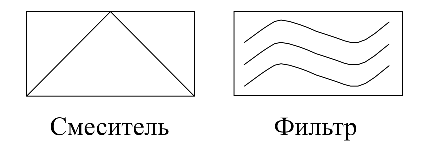


Рис. 3.2 – Схема формирования первичной группы на кварцевых фильтрах

Условные обозначения:



Кратко рассмотрим принцип работы группообразующего устройства (рис. 3.2). На вход смесителя подается исходный сигнал и сигнал несущей частоты. Затем

сигнал со смещенным на несущую частоту спектром с выхода смесителя подается на полосовой фильтр. Образуется 12 канальная первичная, стандартная группа. Здесь требуется 12 различных кварцевых полосовых фильтров, что экономически нецелесообразно. Спектр сигнала на выходе изображен на рис. 3.3.

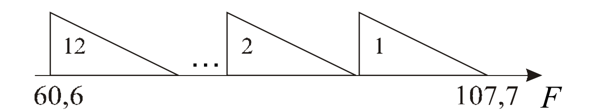


Рис. 3.3 – Спектр сигнала на выходе

2. *Способ формирования первичной группы — с использованием LC фильтров (с двухкратным преобразованием частоты).*

Здесь формируются четыре подгруппы из трех каналов каждая и применяется второе преобразование частоты. Устройство формирования, изображенное на рис. 3.4, имеет принцип работы, схожий с описанным выше.

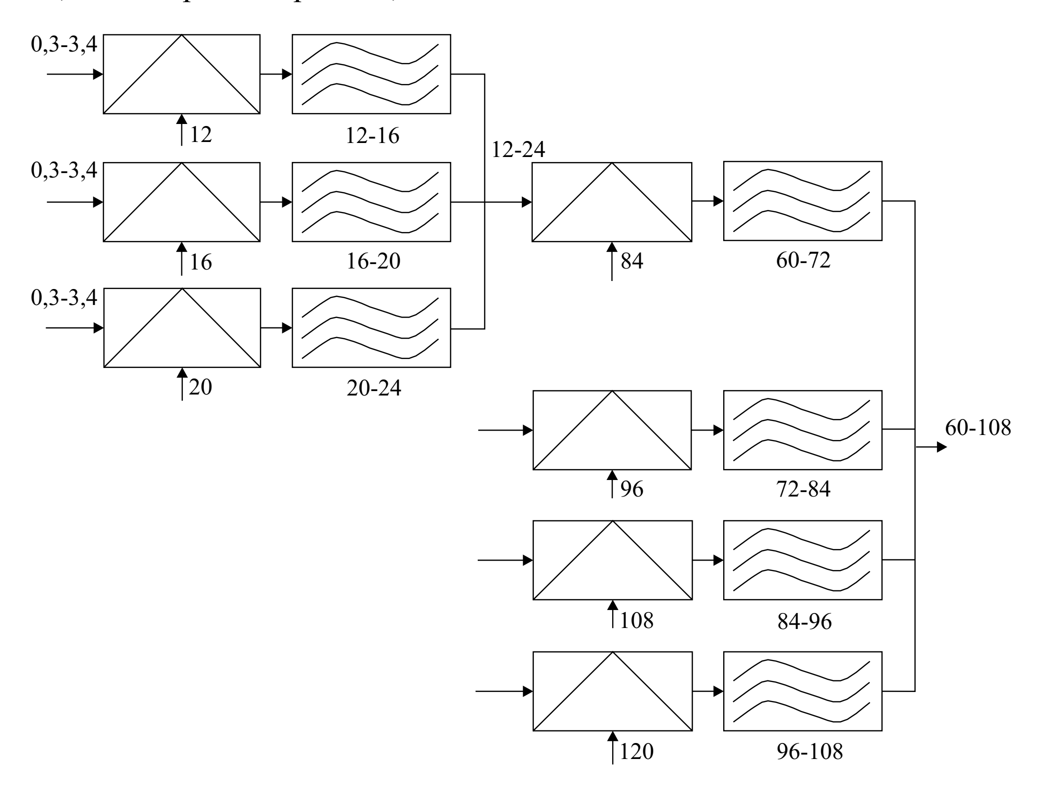


Рис. 3.4 – Схема формирования первичной группы с LC фильтрами

На этих этапах:

- $\delta_1 = \dfrac{2 \cdot F_{\text{MIN}}}{f_{01}} = \dfrac{0{,}6}{20} = 0{,}03$ — первое преобразование частоты;
- $\delta_2 = \dfrac{2 \cdot (f_{01} + F_{\text{MIN}})}{f_{01}} = \dfrac{2 \cdot (12 + 0{,}3)}{120} = 0{,}2$ — второе преобразование частоты.

Условия для применения LC фильтров на 2 этапе еще лучше. В этом заключается главное достоинство этой схемы. Недостаток заключается в наличии дополнительных нелинейных искажений. На рис. 3.5 изображены спектральные преобразования для этой схемы.

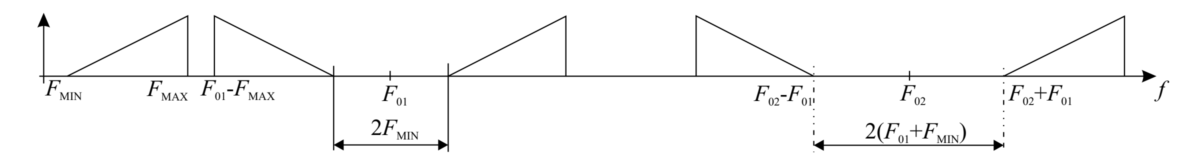


Рис. 3.5 – Спектральные преобразования

3. *Способ формирования первичной группы — с преобразованием частоты вверх.*

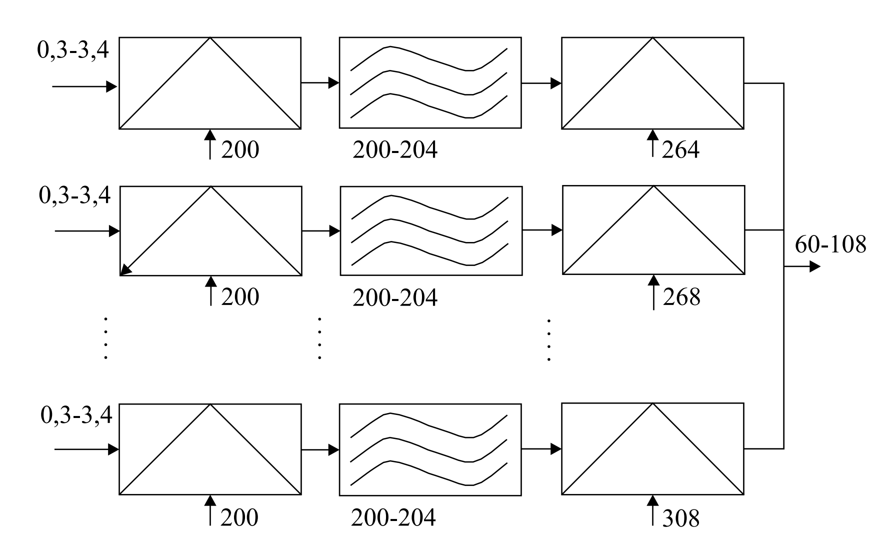


Рис. 3.6 – Схема формирования первичной группы

Кратко рассмотрим принцип работы группообразующего устройства (рис. 3.6). На входы смесителей подаются исходные сигналы и несущая частота, одинаковая для всех. Затем сигналы со смещенными на несущую частоту спектрами подаются на одинаковые полосовые фильтры. Образуется 12 канальная первичная стандартная группа. При втором преобразовании частоты сигналы смещаются вниз по частоте в требуемый частотный диапазон с помощью различных гетеродинов.

Аналогичным образом формируются группы более высоких порядков.

3.2 Помехи в аналоговых системах передачи

Помехи — это мешающие приему информации электрические колебания, связанные с внешними или внутренними причинами.

3.2.1 Классификация помех

1. По месту возникновения:

- Внутренние помехи (возникают в узлах аппаратуры и линиях передачи):
  - собственные помехи (тепловой и дробовой шум);
  - помехи нелинейного происхождения (комбинационные частоты $f_1 \pm f_2 \pm \pm f_3$, возникающие в выходных каскадах передатчиков, преобразователях частоты, детекторах и т. п.);
  - помехи коммутации и плохих контактов.

- Внешние помехи (обуславливаются действием внешних источников естественного происхождения, а также активные помехи):
  - переходные помехи (в металлических кабелях);
  - промышленные помехи (от линий передачи, ТВ вещания и т. п.);
  - грозовые и атмосферные помехи.

2. По форме сигнала:

- Непрерывные помехи: $S_{\max} > (3 \div 10)S_{\text{ср}}$.
- Импульсные помехи: $S_{\max} > (100 \div 1000)S_{\text{ср}}$, где $S_{\text{ср}}$ — среднее напряжение сигналов помехи.

3. По характеру мешающего воздействия:

- Шум любой природы, который складывается с сигналом и для слабых сигналов способен существенно ухудшить разборчивость передаваемого сообщения (речи, данных и т. п.).
- Переходный разговор, возникающий вследствие переходных помех. Внятный переходный разговор нарушает комфортность и конфиденциальность связи, отвлекает абонентов на невольное прослушивание постороннего разговора. Невнятный переходный разговор резко увеличивает шум в канале передачи.

3.2.2 Оценка действия помех

Для оценки действия помех применяются характеристики:

1. Защищенность $A = 10\lg(P_c/P_{\text{п}})$ или через уровни мощностей $A_{\text{з}} = p_c - p_{\text{п}}$.
2. Коэффициент шума $N = \dfrac{P_{c\ \text{вх}}/P_{\text{п вх}}}{P_{c\ \text{вых}}/P_{\text{п вых}}}$ — характеризует возрастание шума внутри активных приборов, прежде всего за счет дробовых шумов.
3. Псофометрическое напряжение (это взвешенное, усредненное в полосе частот напряжение шума).

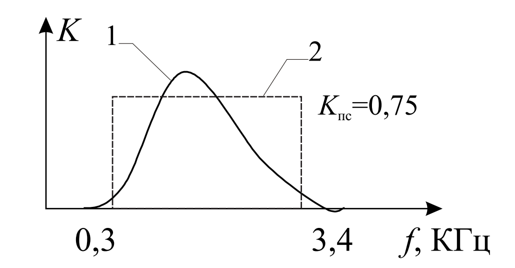
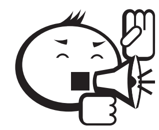


Рис. 3.7 – Частотная характеристика системы «канал ТЧ + ухо человека»

На рис. 3.7 представлена частотная характеристика системы «канал ТЧ + ухо человека» (1) и его псофометрический эквивалент (2).

3.2.3 Накопление собственных помех в линейном тракте



Одним из существенных недостатков аналоговых систем передачи является накопление собственных помех в линейном тракте по мере прохождения сигнала. Рассмотрим участок линейного тракта, состоящий из источника сигнала (генератора), линии передачи (ЛП) и усилителя (У) (рис. 3.8).

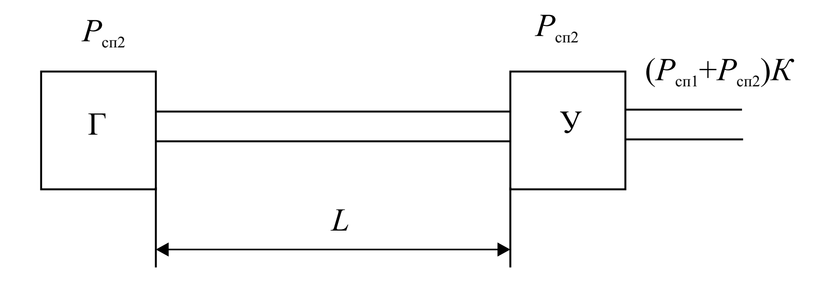


Рис. 3.8 – Схема участка линейного тракта

Генератор содержит в своем составе усилитель с мощностью собственных шумов, приведенных к входу, $P_{сп1}$ и коэффициентом усиления по мощности К. Мощность собственных шумов складывается из мощностей тепловых и дробовых шумов.

$$P_{тш} = k \cdot T \cdot \Delta f, \tag{3.1}$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ ДЖ/град — постоянная Больцмана, T — температура, Δf — полоса частот линейного тракта.

Мощность дробовых шумов характеризуется коэффициентом шума

$$N = \frac{P_{свх}/P_{швх}}{P_{свых}/P_{швых}} = \frac{1}{К} \cdot \frac{P_{швых}}{P_{швх}}. \tag{3.2}$$

Он показывает, во сколько раз уменьшается отношение сигнал-шум на выходе усилителя за счет возникновения дробовых шумов, или во сколько раз увеличивается мощность шума, приведенная ко входу усилителя. Уровень собственных шумов, приведенных ко входу с учетом (3.2):

$$\rho_{сп} = 10\lg(P_{тш} + P_{дш}) = 10\lg(P_{тш} \cdot N) = \rho_{тш} + n, \tag{3.3}$$

где $n = 10\lg(N)$ — потери шумозащищенности.

Мощность шума на выходе генератора $P_{сп1} \cdot$ К. Распространяясь по линии, сигнал и шум затухают, и это затухание по мощности есть A. В линейном тракте должно соблюдаться условие поддержания одного и того же уровня сигнала. Для этого коэффициент усиления должен быть равен затуханию в линии

$$К = A. \tag{3.4}$$

Если перейти к уровням передачи, то

$$К_{дБ} = \alpha l, \tag{3.5}$$

где $К_{дБ}$ — коэффициент усиления в *дБ*; l — длина участка линейного тракта, км; α — коэффициент затухания линии, *дБ*/км.

При выполнении условия (3.4), на входе усилителя шумы генератора и шумы усилителя будут суммироваться. Поскольку источники шума не коррелированны, то это суммирование можно проводить без учета фазовых соотношений, некогерентно. Поэтому суммарная мощность шумов будет

$$P_{\text{сп}\,\Sigma} = P_{\text{сп}1} + P_{\text{сп}2}.$$

Этот процесс можно продолжить. Для m участков получим:

$$P_{\text{сп}\,\Sigma}(0) = \sum_{i=1}^{m} P_{\text{сп}i}(0) = P_{\text{сп}}. \tag{3.6}$$

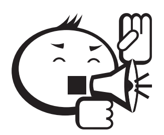
Уровень суммарной, приведенной к ТНОУ(1mВт) помехи найдем из (3.6)

$$P_{\text{сп}\,\Sigma}(0) = 10\lg\frac{P_{\text{сп}\,\Sigma}}{\text{мВТ}} = p_{\text{тш}} + d + К_{\text{дБ}} + 10\lg m - p_{\text{г}}. \tag{3.7}$$

При составлении (3.7) учитывался уровень теплового шума на входе усилителя $p_{\text{тш}}$, уровень коэффициента шума (потери шумозащищенности) d, а также те факторы, что результирующий шум находится на выходе последнего участка, содержащего усилитель с коэффициентом усиления К, и мощность на выходе генератора $P_{\text{ген}}$ может отличаться от значения 1 *мВт*. Поэтому в (3.7) в правой части вычитается уровень $p_{\text{г}}$, соответствующий мощности $P_{\text{ген}}$.

Для уменьшения влияния собственных помех (увеличение защищенности) необходимо уменьшить полосу частот приемного тракта Δf и применять малошумящие усилители во входных каскадах приемников (снижение коэффициента шума).

3.2.4 Переходные помехи



Эти помехи в АСП на электрических кабелях возникают в основном за счет электромагнитной связи между параллельными парами проводников в многопарных кабелях. Эта паразитная связь (наводка) имеет несколько механизмов возникновения, основными из которых является связь по электрическому полю.

Удельный вес электрической и магнитной составляющей зависит от частоты сигнала, от числа пар в кабеле и их взаимного расположения. Так, например, для канала тональной частоты подавляющий вклад в переходную помеху вносит электрическая составляющая.

При рассмотрении влияния между двумя парами различают два вида перехода энергии: на ближнем (передающем) конце и на дальнем (приемном) конце (рис. 3.9). Из рисунка видно, что помеха на ближний конец проявляется при встречных движениях сигналов в каналах, а помеха на дальний конец — при согласованной передаче.

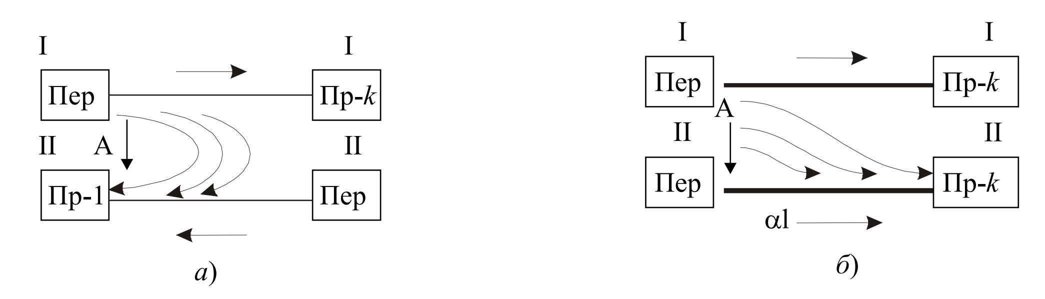


Рис. 3.9 – Возникновение переходных помех:
а) на ближнем конце; *б*) на дальнем конце

Помеха на ближний больше, чем помеха на дальний конец, по ряду причин:

1) в силу фазовых соотношений электрическая и магнитная составляющие поля наводки на ближнем конце складываются, в то время как на дальнем конце они вычитаются;
2) наиболее значительная часть наводки возникает вблизи передатчика активной (влияющей) линии. На ближний конец она воздействует непосредственно, в то время как на дальнем конце наводка затухает так же, как и полезный сигнал;
3) эффект синфазного накопления наводки на дальний конец устраняется скручиванием как каждой пары в кабеле, так и всего жгута.

Способы снижения переходных помех:

1) применение скручивания пар в кабеле — снижение помехи на дальнем конце;
2) организация передачи в двухкабельных системах, когда все каналы в прямом направлении передаются по проводным парам, собранным в одном кабеле, а все встречные каналы в другом кабеле, изолированном от первого металлической экранирующей оболочкой. При этом наиболее существенная помеха на ближний конец практически устраняется;
3) для устранения внятного переходного разговора при согласованной передаче применяется инверсия или смещение спектра сигналов (рис. 3.10).

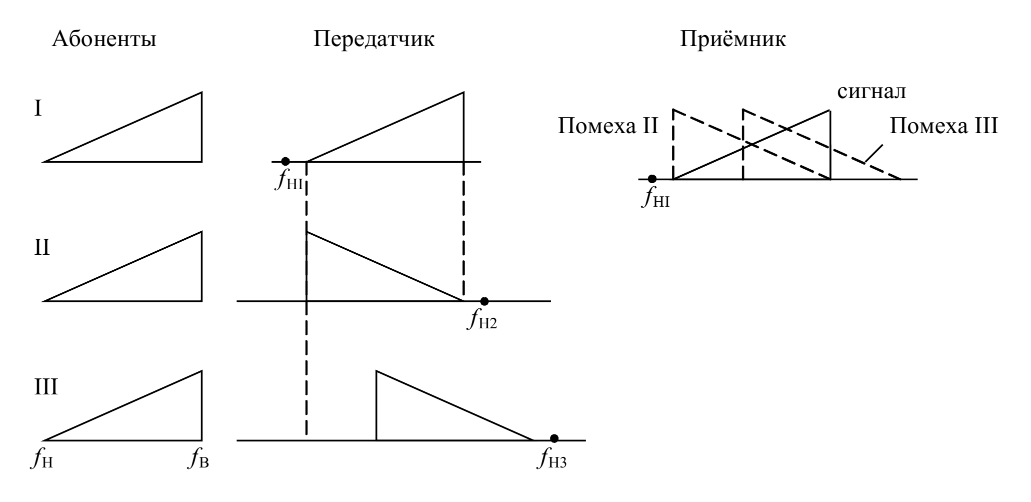


Рис. 3.10 – Устранение внятных помех

В этом случае внятная переходная помеха превращается в невнятную (помеха III). Ослабление помехи может составлять 5–25 *дБ*.

3.2.5 Нелинейные помехи

Нелинейные помехи возникают как в сугубо нелинейных приборах (преобразователи частоты, детекторы и т. п.), так и в усилительных элементах, особенно в ограничителях и выходных каскадах усилителей мощности за счет отклонения их вольт-амперной характеристики от линейной. Как и другие виды помех, нелинейные помехи накапливаются от участка к участку.

Продуктами нелинейности являются гармоники (в основном вторая и третья) и комбинационные составляющие типа $nf_1 + mf_2 + kf_3 + \ldots$, если $f_1, f_2, f_3, \ldots$ — частоты составляющих на входе усилителя, а $n, m, k = 1, 2, 3, \ldots$. Чтобы нелинейные составляющие помех были меньше нормы, напряжение сигнала не должно превышать порог перегрузки усилителя $U_{\text{п}}$ или уровень $\rho_{\text{г}}$.

Порогом перегрузки является уровень мощности $p_{\text{п}}$ на выходе усилителя, при котором увеличение уровня сигнала на входе на 1 *дБ* приводит к увеличению уровня третьей гармоники на выходе на 20 *дБ*.

Для количественной оценки нелинейных свойств канала вводят понятие затухания нелинейности по второй и третьей гармоникам

$$a_{2\text{г}} = 10\lg\left(\frac{P_{1\text{г}}}{P_{2\text{г}}}\right) = p_{\text{пер}} - p_{2\text{г}};$$

$$a_{3\text{г}} = 10\lg\left(\frac{P_{1\text{г}}}{P_{3\text{г}}}\right) = p_{\text{пер}} - p_{3\text{г}},$$

где $P_{1\text{г}}, P_{2\text{г}}, P_{3\text{г}}$ — мощности первой, второй и третьей гармоник, а $p_{\text{пер}}, p_{2\text{г}}, p_{3\text{г}}$ — их уровни соответственно. Заводы-изготовители обычно нормируют значения $a_{2\text{г}}$ и $a_{3\text{г}}$.

Для снижения уровня нелинейных помех применяют обязательную их нормировку, стараются комбинировать виды трафика в каналах, чтобы не увеличивать пик-фактор, а также применяют усилители с автоматической регулировкой усиления (АРУ).



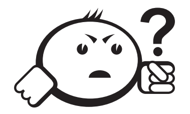
Выводы

Системы с ЧРК в электрических кабелях — исторически первые системы группообразования.

В настоящее время применение ЧРК в электрических кабелях незначительно (сельские линии связи, системы ADSL, кабельное телевидение).

Недостатки ЧРК — сложность и громоздкость полосовых фильтров, низкая избирательность, большой уровень нелинейных и переходных помех.

ЧРК широко применяется в сочетании с ВРК в цифровых системах передачи в радио- и оптическом диапазонах как грубый способ разделения групповых сигналов.



Контрольные вопросы по главе 3

1. Зачем в системах с ЧРК применяется модуляция с ОБП?
2. Какова причина появления переходных помех?
3. Какова причина появления нелинейных помех?
4. Назовите механизм возникновения дробового шума.

Глава 4

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ (ЦСП)

4.1 Принципы цифровой передачи информации

4.1.1 Структурная схема ЦСП

В настоящее время цифровые методы и устройства передачи информации являются основными в телекоммуникационных системах благодаря совокупности своих достоинств, таких как высокая помехоустойчивость, простота группообразования, возможность интеграции разнородного трафика, высокая технологичность и др. [3, 4, 16]. Укрупненная структурная схема ЦСП приведена на рис. 4.1.

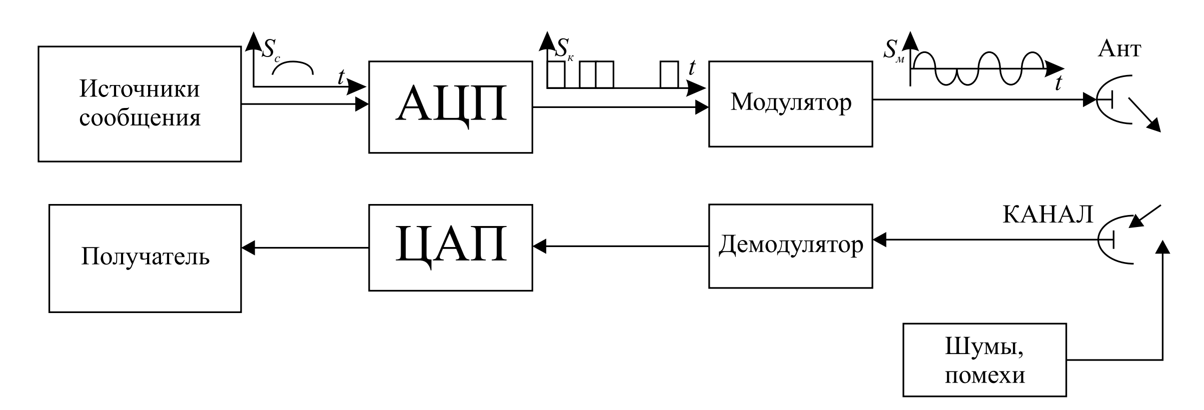


Рис. 4.1 – Структурная схема ЦСП

Здесь аналоговый сигнал $S_c(t)$ с выхода источника сообщения проходит через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразуясь в двоичный цифровой код $S_k(t)$. Для передачи по линии связи (медный кабель, ВОЛС, радиоканал) этот сигнал с помощью модулятора или кодирующего устройства преобразуется к виду $S_{\text{м}}(t)$, позволяющему передачу на большие расстояния с минимальными искажениями. В приемной части ЦСП происходят обратные преобразования с помощью

демодулятора и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). В канале передачи сигнал $S(t)$ искажается при воздействии шумов и помех, которые наиболее эффективно проявляют себя в канале связи и во входных каскадах приемника.

4.1.2 Цифровой сигнал

Прежде чем рассмотреть процедуру его формирования сформулируем основные принципиальные отличия аналоговых и цифровых сигналов. Аналоговый сигнал представляет из себя бесконечную последовательность значений во времени. Действительно, рядом с каждой точкой на временной оси всегда можно выбрать соседнюю, сколь угодно близко расположенную к ней. Далее, каждое из этих значений может принимать любую величину в каком то интервале, причем число этих возможных значений тоже бесконечно. Например, значение вблизи 1 может быть 0,9; 0,99; 0,999 и т. д. Поскольку число значений аналогового сигнала бесконечно во времени и по амплитуде, то его можно назвать бессчетным. Теперь ясно, какие требования нужно предъявить к цифровому сигналу. Число его возможных значений как во времени, так и по амплитуде должно быть конечным, т. е ограничено каким-то числом. Цифровой сигнал должен быть счетным.

Рассмотрим процесс формирования цифрового сигнала (рис. 4.2), который можно разбить на три этапа:

На первом этапе вместо непрерывной функции времени $S_C(t)$ формируется совокупность дискретных отсчетов $S_C(t - \text{к}\tau_{\text{д}})$, взятых в равноотстоящих друг от друга моментах времени с интервалом $\tau_{\text{д}}$.

В соответствии с теоремой Котельникова этот интервал определяется верхней частотой в спектре сигнала $f_{\text{в}}$

$$\tau_{\text{д}} \leqslant \frac{1}{2f_{\text{В}}}. \qquad (4.1)$$

Обосновать это неравенство можно следующим образом. Спектр дискретизируемого сигнала (рис. 4.3) является периодической функцией частоты f с периодом $1/\tau_{\text{д}}$. Для того чтобы лепестки этой функции не перекрывались, необходимо, чтобы:

$$\frac{1}{\tau_{\text{д}}} \geqslant 2f_{\text{в}}.$$

Если это неравенство не выполняется, спектр сигнала искажается в области высоких частот. Во временной области это приводит к тому, что наиболее быстрые изменения сигнала при дискретизации будут пропущены.

Теорему Котельникова можно объяснить более простым образом. Возьмем гармоническую составляющую с частотой $f_{\text{в}}$. Для ее описания с помощью дискретных отсчетов необходимо задать 2 отсчета на период. Полученный дискретный сигнал или сигнал с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) может принимать в своих отсчетах любые непрерывные значения. Таким образом дискретный сигнал еще не стал цифровым. В качестве примера найдем время дискретизации для канала тональной частоты. При $f_{\text{в}}$ = 3,4 кГц выберем частоту дискретизации 4 кГц. Тогда $\tau_{\text{д}}$ = 125 мкс. Чтобы число амплитудных значений было конечно, на втором этапе (рис. 4.2, *б*) проводят операцию квантования. Она заключается в том, что значение отсчета сравнивается с некоторым уровнем, близким к нему, и приравнивается

либо к величине этого уровня, либо к другой величине, связанной с ним. Такой величиной, например, может быть среднее значение между соседними уровнями.

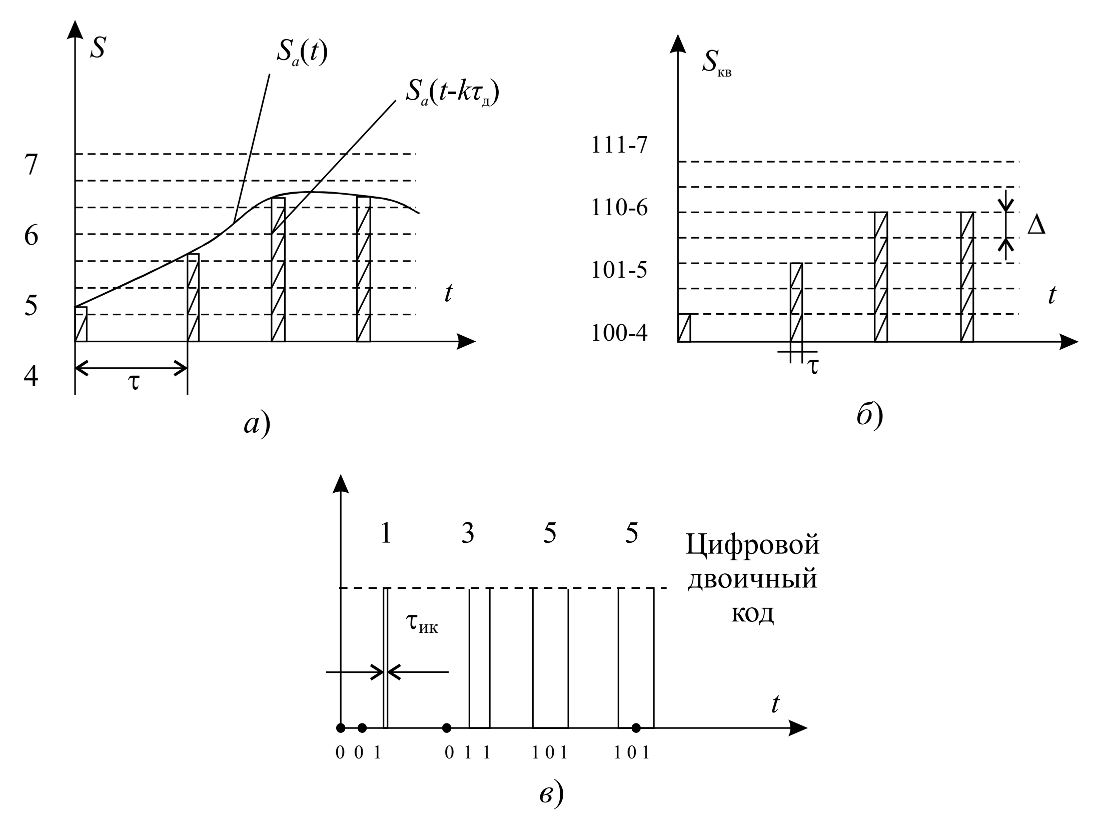


Рис. 4.2 – Формирование цифрового сигнала:
а) дискретизация во времени; *б*) квантование по уровню;
в) кодирование (импульсно-кодовая модуляция)

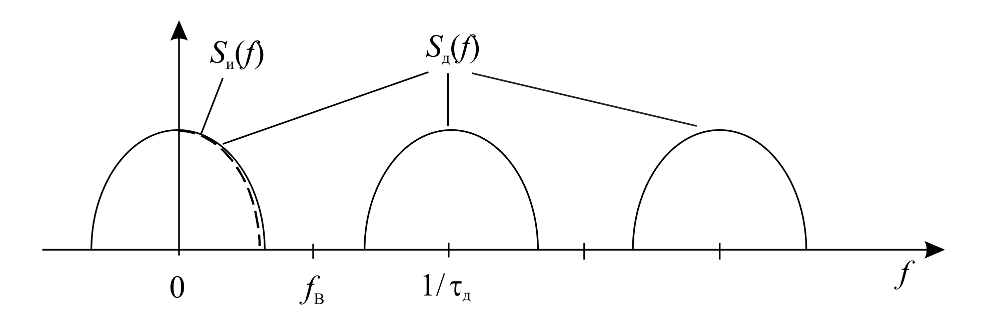


Рис. 4.3 – Спектр дискретного сигнала

При равномерном квантовании расстояние между соседними уровнями (шаг квантования) Δ одинаково. Процесс квантования сопровождается искажениями сигнала, которые тем больше, чем больше Δ. Эти искажения можно охарактеризовать мощностью шумов квантования, которая пропорциональна величине $(\Delta/2)^2$. Поскольку отсчеты дискретного сигнала S_k являются случайной величиной, статистическое усреднение для равномерного квантования приводит к результату:

$$P_{ш\ кв} = \frac{1}{3}\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 = \frac{\Delta^2}{12}. \qquad (4.2)$$

В свою очередь, шаг квантования Δ зависит от максимального значения сигнала S_{max} и числа уровней n.

Число уровней квантования можно найти, задавая отношение сигнал-шум, если в качестве основного источника шума взять шумы квантования.

$$\frac{P_{\text{сиг}}}{P_{\text{шкв}}} = 10\lg\frac{\overline{S}^2}{\Delta^2/12} = 10{,}8 + 20\lg\frac{S_{\text{ср}}}{\Delta}. \qquad (4.3)$$

Если сигнал гармонический:

$S = S_m \cos\omega_0 t$, то

$$\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} = 10\lg\left[\frac{S_m^2}{2}\bigg/\frac{\Delta^2}{12}\right] = 7{,}78 + 20\lg\frac{S_m}{\Delta} = 7{,}78 + 20\lg n. \qquad (4.4)$$

В (4.3) и (4.4) — $\overline{S}$ = среднее значение, а S_m — амплитуда сигнала.

В соответствии с требованиями стандартов минимум качества обеспечивается при $P_{\text{с}}/P_{\text{ш}} = 26$ *дБ*. Подставляя это значение в (4.4), найдем $n = 8$.

Но это соотношение должно выполняться для самого минимального входного сигнала. Если учесть динамический диапазон сигнала на входе и взять случай более высокого качества передачи, то число уровней n будет много больше 8. Так, если $D = 40$ *дБ*, то $n = 800$, а разрядность кодера $r = 10$.

Приведенный пример указывает на избыточность, возникающую при формировании цифрового сигнала, поскольку нет необходимости большие значения входного сигнала передавать с такой же точностью, что и малые. Поэтому при квантовании применяют процедуру неравномерного квантования (рис. 4.4), когда шаг квантования входного сигнала увеличивается с ростом сигнала. Эта процедура называется компрессией, или сжатием, динамического диапазона. На практике компрессию совмещают с кодированием, применяя кусочно-линейную характеристику вместо логарифмической (рис. 4.5). При этом угол наклона отрезков прямых в каждом сегменте уменьшается в два раза. Применение неравномерного квантования позволяет ограничить число разрядов $r = 8$.

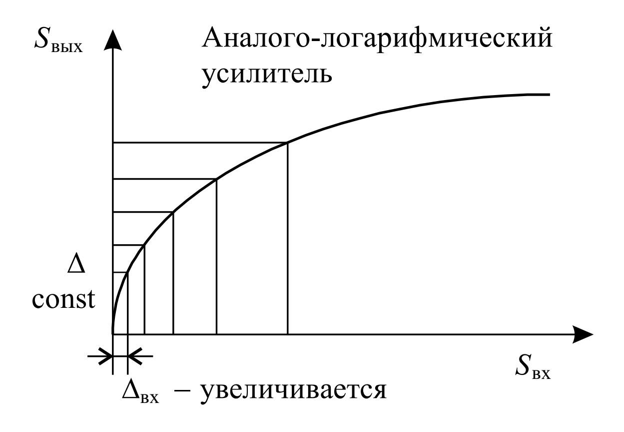


Рис. 4.4 – Неравномерное квантование

Можно сделать вывод, что после операции квантования сигнал стал «счетным» как во времени, так и по амплитуде, т. е. он стал цифровым. Если значения

уровней представлены в десятичной системе исчисления, то и цифровой сигнал будет представлен в десятичном коде. Такие сигналы широко применяются в ЦСП (многоуровневое кодирование).

На третьем этапе сигнал $S_{кв}(t)$, дискретный во времени и по амплитуде, с помощью импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) преобразуется в цифровой код. Наиболее распространенным является двоичный цифровой код (рис. 4.2, *в*). Особенностью этого кода, представленного набором электрических импульсов, является то, что длительность каждого импульса в кодовой комбинации ИКМ $\tau_{ик} = \tau_{и}/r$ в r раз меньше длительности исходного импульса. Это приводит к соответствующему расширению спектра.

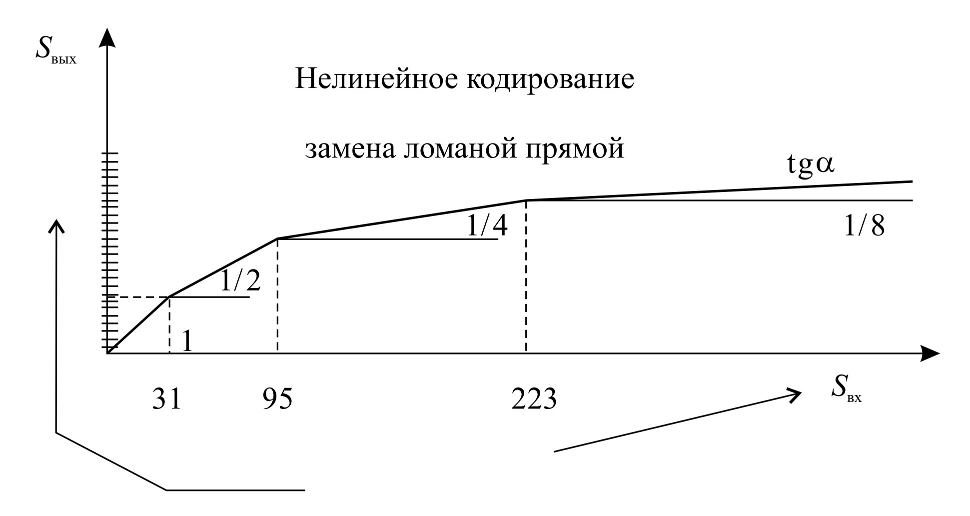


Рис. 4.5 – Аппроксимация при неравномерном квантовании

4.1.3 Группообразование

Поскольку длительность импульса дискретизации (выборки) $\tau_{и}$ много меньше $\tau_{д}$ $\tau_{и} \ll \tau_{д}$, временной интервал $\tau_{д}$ между соседними импульсами одной функции $S_1(t)$ можно заполнить отсчетами других каналов (рис. 4.6). В этом случае каналы разделяются во времени и передаются в одной и той же полосе частот. Этот процесс носит название временного разделения каналов (ВРК) или группообразования. Время, за которое формируется группа, называемся циклом. Длительность цикла есть время цикла $\tau_{ц}$. Нетрудно увидеть, что $\tau_{ц}$ равно времени дискретизации: $\tau_{ц} = \tau_{д}$.

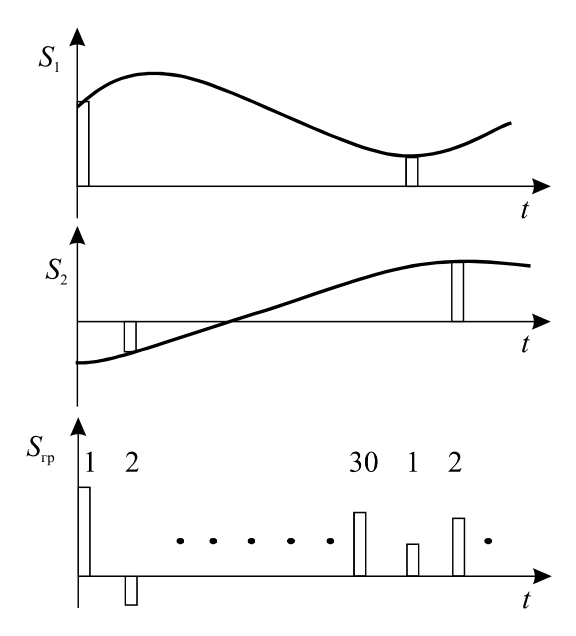


Рис. 4.6 – Группообразование

4.1.4 Линейное кодирование

Цифровой сигнал после процедуры группообразования и АЦП имеет вид, представленный на рис. 4.7, *а*. Он является однополярным, и в нем нетрудно выделить три типичных ситуации:

1) чередование нулей и единиц;
2) последовательность одних единиц;
3) последовательность одних нулей.

Однополярный характер сигнала требует больших энергетических затрат. Для того, чтобы увидеть это, сравним энергию W, необходимую для передачи двух битов в электрической линии с помощью однополярного $S_1(t)$ и биполярного $S_2(t)$ сигналов (рис. 4.8). Если сопротивление нагрузки R = 1 Ом, τ = 1 сек., то

$$W = \frac{S_1^2}{R} \cdot \tau + \frac{S_2^2}{R} \cdot \tau,$$

W_1 = 1 Вт · сек.,

W_2 = 0,5 Вт · сек.

При одинаковой помехоустойчивости (перепад между состояниями равен 1В) преимущества биполярного сигнала очевидны.

Наиболее простым переходом от однополярных сигналов к биполярным является применение кодов ЧПИ (чередование полярности импульсов, рис. 4.7, *б*). Здесь каждый четный импульс меняет полярность.

Как у однополярного сигнала, так и у сигналов ЧПИ есть еще один существенный недостаток. Для нормального функционирования ЦСП с ВРК нужна жесткая синхронизация цифрового потока во времени. Поэтому на приемном конце из цифрового потока обычно выделяют тактовую частоту (частоту следования импульсов).

Если обратиться к рис. 4.7, то нетрудно увидеть, что синхронизация нарушается там, где присутствуют последовательности одних единиц или нулей. Поэтому в кодах ЧПИ на участках с большим числом нулей добавляют специальные биполярные кодовые комбинации, которые при приеме опознаются и удаляются. Такие коды называют модифицированными ЧПИ (МЧПИ).

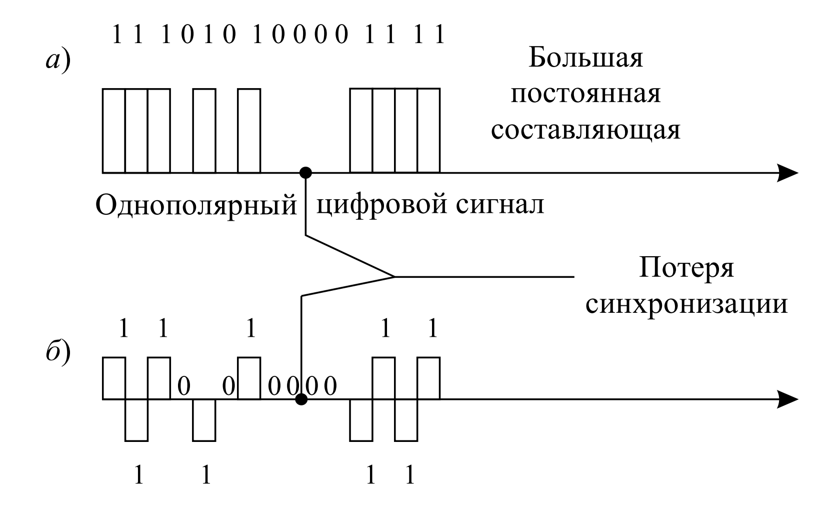


Рис. 4.7 – Преобразование к коду передачи

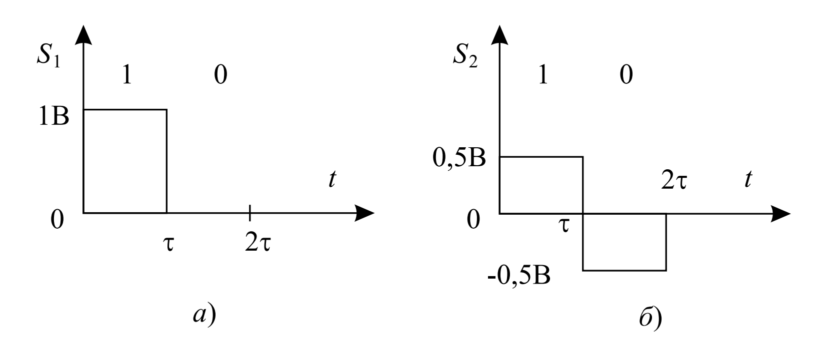


Рис. 4.8 – Элементарные цифровые сигналы

Таким образом, для передачи по протяженной линии связи однополярный цифровой сигнал преобразуют с помощью специальных кодов, которые называют *кодами передачи*, или *линейными кодами*. Помимо ЧПИ и МЧПИ существует много других линейных кодов.

4.1.5 Модуляция

Помимо операции линейного кодирования для качественной передачи цифрового сигнала на большие расстояния по электрическим кабелям и радиолиниям применяют его модуляцию (рис. 4.9). Модуляция, которая в данном случае называется манипуляцией, может быть амплитудной (АМ), фазовой (ФМ), частотной (ЧМ) или их комбинацией.

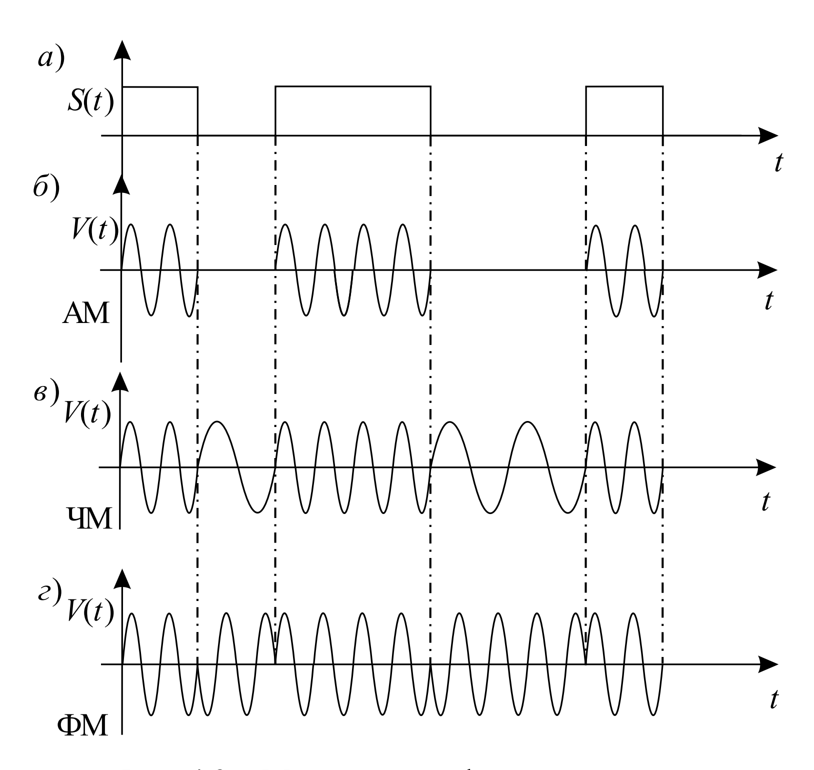
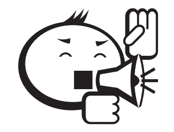


Рис. 4.9 – Модуляция цифрового сигнала:
а) цифровой сигнал; *б*) амплитудная модуляция;
в) частотная модуляция; *г*) фазовая модуляция

4.1.6 Оконечная станция ЦСП



С учетом всего изложенного структурная схема ЦСП приобретает более развернутый, но далеко не окончательный вид (рис. 4.10).

Здесь сигнал от абонента поступает по двухпроводной линии на вход дифференциальной системы, проходит только на один из ее выходов и фильтр нижних частот (ФНЧ) (0,3–3,4 кГц). Затем он подвергается аналогово-цифровому преобразованию с помощью амплитудно-импульсного модулятора (АИМ) $\tau_д$ = 125 мкс., компрессора и кодера ИКМ. Операции квантования и кодирования производятся для группового сигнала. Этот групповой сигнал формируется путем суммирования дискретных сигналов с выхода различных АИМ. На структурной схеме этот процесс объединения представлен стрелками с подписью «от других каналов». Устройство объединения к сигналам от абонентов подмешивает служебные сигналы (синхронизация, сигнализация и др.), которые помещаются на свои временные позиции в виде специальных кодовых комбинаций. Операцией компоновки группового сигнала управляет распределитель сигналов, частота следования импульсов задается тактовым генератором. На приемном конце линии связи происходят обратные преобразования.

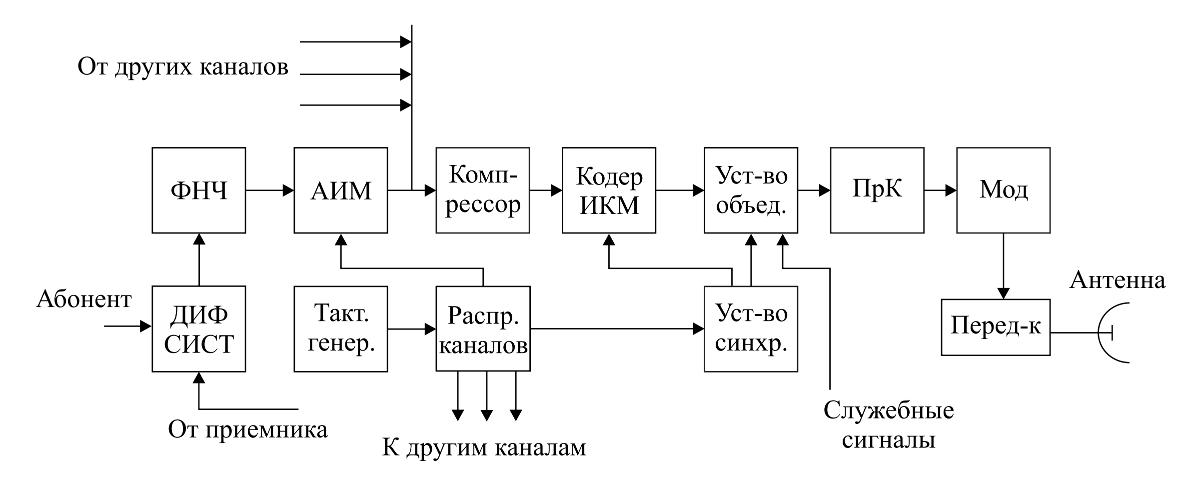


Рис. 4.10 – Структурная схема оконечной ЦСП (передающий канал)

4.1.7 Достоинства и недостатки ЦСП

Достоинства цифровых методов передачи:

- высокая помехоустойчивость обеспечивается наличием в двоичном цифровом сигнале всего двух состояний. В связи с этим воздействие импульсной помехи на цифровую линию передачи не так эффективно, как в случае аналоговой линии (рис. 4.11).

  В аналоговой линии помеха существенно искажает форму сигнала, в то время как в цифровой та же помеха не повлияет на принятие решения о приеме «1», если превышено значение порога $S_{\text{пор}}$;
- нечувствительность цифровой системы передачи к искажениям сигнала позволяет реализовать еще одно замечательное свойство — возможность регенерации (рис. 4.12). Здесь при распространении сигнала вдоль линии происходит его ослабление и искажение формы. При снижении амплитуды до значения, близкого к порогу, регенератор формирует импульс, подобный исходному, и процесс повторяется. Нетрудно убедиться в том, что в такой системе передачи не происходит накопления воздействия шумов и помех по мере прохождения сигнала вдоль линии;
- простота группообразования по сравнению с системами с частотным разделением каналов, так как временные мультиплексоры и демультиплексоры существенно проще в реализации, чем система гетеродинов и частотно-избирательных фильтров;
- возможность интеграции услуг телефонии, передачи данных и телевидения, поскольку при преобразовании в цифровую форму сигналы для всех видов трафиков приобретают универсальную форму (двоичный сигнал);
- возможны различные процедуры обработки цифровых сигналов (фильтрация, кодирование и др.) в процессе их передачи и приема в реальном масштабе времени;

- экономичность производства и эксплуатации оборудования ЦСП, его малый вес и габариты благодаря применению технологий современной микроэлектроники.

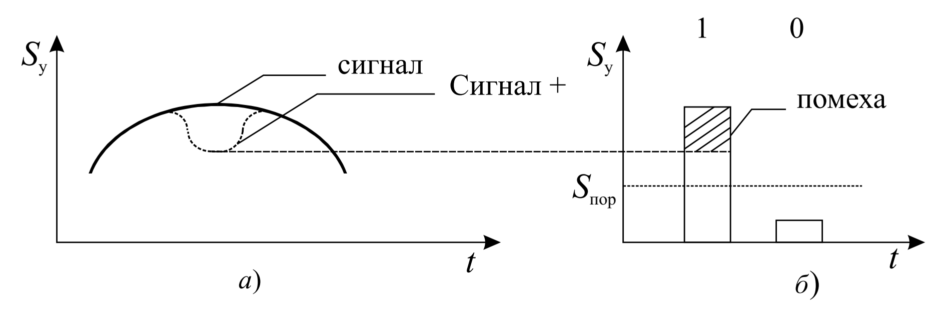


Рис. 4.11 – Воздействие импульсной помехи на аналоговую (*а*) и цифровую (*б*) линии передачи

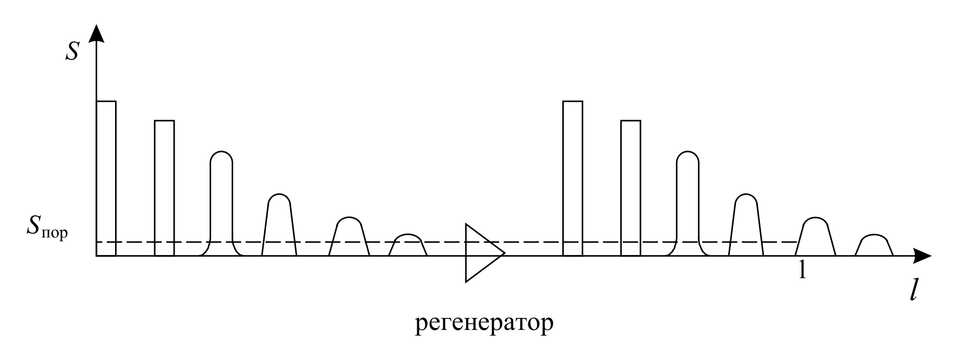
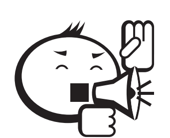


Рис. 4.12 – Процесс регенерации



Одним из замечательных свойств цифровых сигналов является возможность количественной оценки любых самых различных видов информации.

Дадим здесь определение количества информации. Количество информации — это энтропия или мера неопределенности в поведении источника дискретных (счетных) данных. Раскрывая эту неопределенность с помощью переданных нам сообщений, мы и получаем информацию. Поясним это определение на простом примере, который связан с прогнозом погоды.

Пусть мы имеем два возможных события: 1 — нет осадков, 2 — осадки. Получив информацию о будущем состоянии погоды, мы ликвидируем неопределенность наших знаний и получаем какой-то объем информации. Увеличим точность прогноза до четырех возможных состояний: 1 — нет осадков, 2 — осадки до обеда, 3 — осадки после обеда, 4 — осадки ночью. Очевидно, что здесь объем полученной информации C будет больше, чем в первом случае. Видно, что чем больше число возможных состояний (уровней) l в информационном поле, тем больше ее объем.

Было предложено эту связь выразить логарифмической зависимостью.

Для наиболее простого случая, когда значения уровней не зависят друг от друга и их появление равновероятно:

$$C = \log_2 l.$$

Другие более сложные случаи рассмотрены в публикациях по теории информации. Для наших двух примеров объем передаваемой информации будет

$$C_1 = \log_2 2 = 1 \text{ единица информации},$$

$$C_2 = \log_2 4 = 2 \text{ единицы информации}.$$

Теперь нужно ввести единицу информации. Ею является количество информации, передаваемое за одну посылку, если число уровней информации $l = 2$ (0 и 1). Эта единица носит название бит. Выражение (2.5) позволяет с единых позиций измерить количество информации в любых информационных потоках (речь, видео и др.). Для этого необходимо определить число уровней l в каждом отсчете и число этих отсчетов. Так, для основного цифрового канала обычно $l = 256$.

К недостаткам цифровых методов передачи можно отнести:

- расширение частотного диапазона, необходимого для передачи информации. Это происходит вследствие того, что информация передается последовательностью коротких импульсов с широким спектром;
- необходимость четкой синхронизации процессов во времени.

Эти недостатки преодолеваются при совершенствовании методов передачи.

4.2 Компандирование в ЦСП

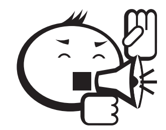
Принципы компандирования кратко были рассмотрены в подразделе 4.1.2. Здесь этот вопрос рассмотрим более подробно. При равномерном квантовании шаг квантования Δ одинаков как для малых, так и для больших значений входных сигналов. Это приводит к появлению избыточности при передаче, которая проявляется следующим образом:

- число отсчетов n в заданном динамическом диапазоне равномерно распределено и при заданных критериях качества будет составлять $n = 2000–4000$;
- защищенность системы передачи по отношению к шумам квантования

$$A_{\text{зс}} = \frac{P_c}{P_{\text{шкв}}} = \frac{P_c}{\Delta^2/12}$$

  при постоянном Δ будет увеличиваться с ростом амплитуды и, соответственно, мощности входного сигнала P_c, т. е. будет не постоянной. Таким образом, сильные сигналы передаются с лучшей помехоустойчивостью;
- значения входного сигнала U_c являются случайной величиной. Вероятность их появления характеризуется плотностью $p(U_c)$ (рис. 4.13), причем вероятность появления больших значений невысока. Это объясняется тем, что мы произносим громкие звуки гораздо реже, чем тихие. Поэтому шумы квантования для больших значений U_c не так существенны, как для малых.

Все эти факторы обосновывают применение нелинейного кодирования или неравномерного квантования.



Основные требования, предъявляемые к таким кодерам:

- восьмиразрядная кодовая комбинация;
- возможность регистрации полярности сигнала;
- минимизация шумов квантования;
- слабая зависимость защищенности от шумов квантования в заданном динамическом диапазоне;
- компрессия должна быть совмещена с кодированием.

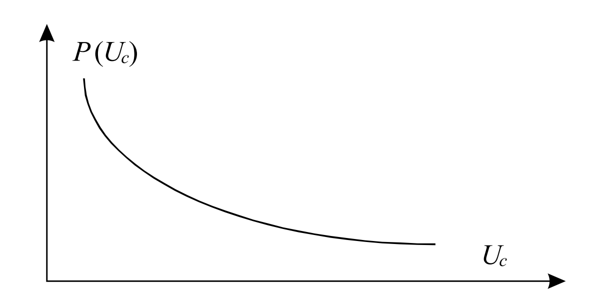


Рис. 4.13 – Плотность распределения вероятности значений входного сигнала

В практике нелинейного кодирования можно использовать следующие методы:

1. *Аналоговое компандирование* (рис. 4.14).

Здесь вначале с помощью аналогового компрессора сжимается динамический диапазон входного сигнала, затем производится равномерное квантование с числом уровней квантования $n = 2^8 = 256$ и кодирование. Если сигнал биполярный, то применяют симметричный двоичный код, когда первый разряд используется для передач знака сигнала, а остальные семь для передачи его значения. На приемном конце используется обратная операция экспандирования. Поэтому весь процесс сжатия и расширения динамического диапазона называют компандированием.

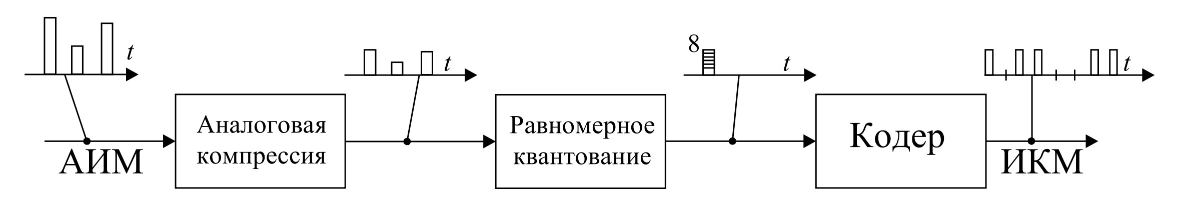


Рис. 4.14 – Принцип аналогового компандирования

В современных ЦСП находят применение две логарифмические характеристики (рис. 4.15) компандирования $y = f(x)$, где

$$y = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{огр}}}, \quad x = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{огр}}},$$

1) A — типа

$$y = \begin{cases} \dfrac{A|x|}{1 + \ln A}, & 0 \leqslant |x| \leqslant \dfrac{1}{A}, \\ \dfrac{1 + \ln\left(A|x|\right)}{1 + \ln A}, & \dfrac{1}{A} \leqslant |x| \leqslant 1 \end{cases}$$

где $A = 87{,}6$; A и μ — параметры компрессии, характеризующие степень сжатия; $U_{\text{огр}}$ — уровень ограничения входного сигнала.

2) μ — типа

$$y = \frac{\ln\left(1 + \mu|x|\right)}{\ln(1 + \mu)},\ 0 \leqslant |x| \leqslant 1,$$

где $\mu = 255$.

Характеристика компандирования типа A используется в ЦСП европейской иерархии, а типа μ — североамериканской. В связи с глобализацией телекоммуникационных систем современные ЦСП поддерживают как μ- так и A-кодирование.

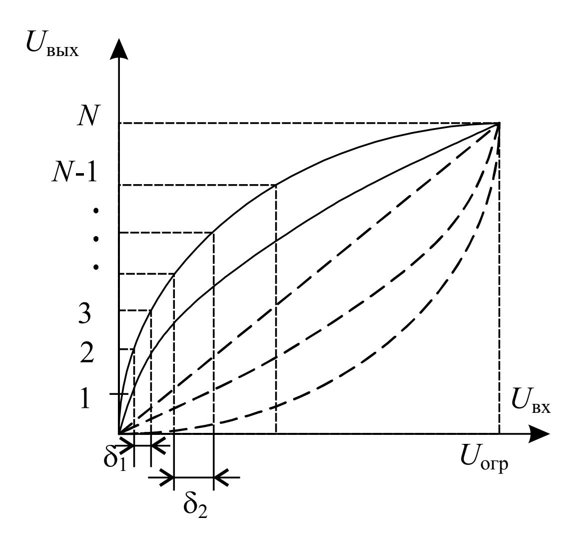
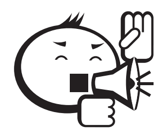


Рис. 4.15 – Характеристики компрессии и экспандирования

2. *Нелинейное компандирование.*



Этот способ сжатия заключается в том, что плавную характеристику компрессора заменяют кусочно-ломаной кривой и процесс сжатия динамического диапазона совмещают с кодированием так, что на выходе устройства появляется восьмиразрядный двоичный код. Такие компандеры наиболее широко применяются в современных цифровых системах передачи и выполняются с использованием как μ- так и A-характеристик.

Характеристика A-компрессии для положительных значений входного сигнала приведена на рис. 4.16.

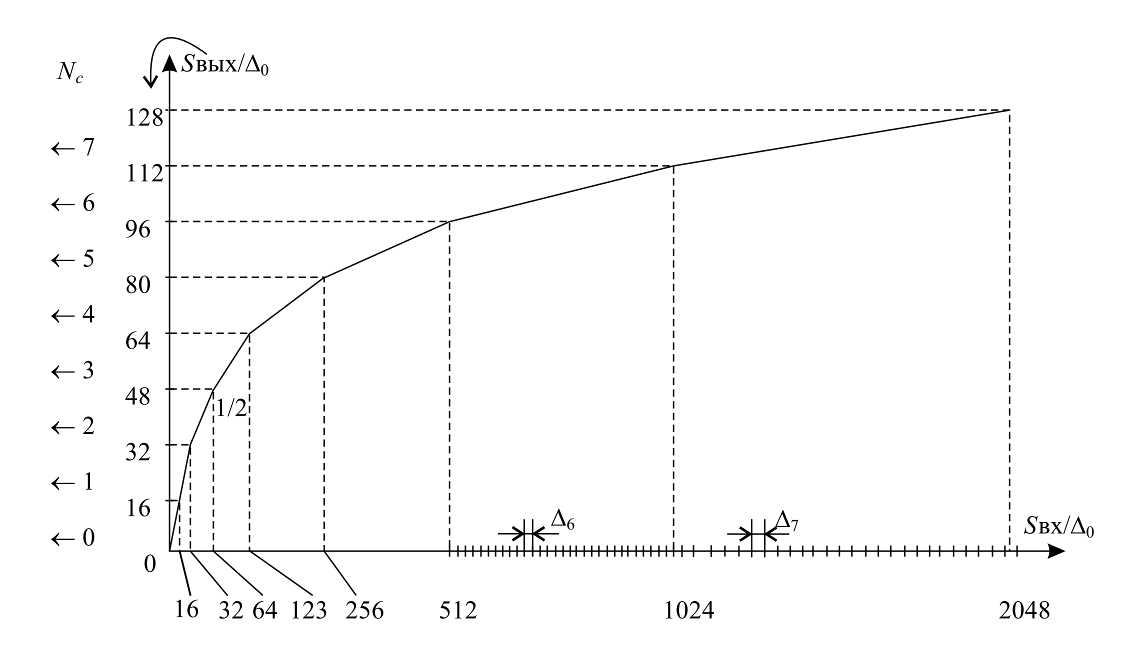


Рис. 4.16 – Характеристика компандирования типа $A = 87{,}6/13$

Здесь ломаная кривая содержит 8 сегментов для положительных значений входного сигнала и столько же отрицательных. Нумеруются сегменты так: 0, 1, 2,..., 7. Каждый сегмент с номером N_c содержит 16 позиций с одинаковым шагом квантования Δ_N. Для удобства цифрового кодирования при переходе от сегмента к сегменту шаг квантования увеличивается в два раза. Поскольку в выходном сигнале шаг квантования одинаков во всех сегментах, угол наклона отрезков прямых в соседних сегментах должен отличаться в два раза. Для A-характеристики компрессии это условие ближе всего для значения параметра $A = 87{,}6$. На практике сегменты с номерами 0 и 1 имеют одинаковый наклон и одинаковый шаг квантования Δ_0. Поэтому реально A-характеристика имеет не 16, а 13 сегментов, и часто ее обозначают $A = 87{,}6/13$.

Каждый сегмент характеристики $A = 87{,}6/13$ начинается со значения эталонного напряжения $U_{\text{эт}}^N$. Значения $U_{\text{эт}}^N$ и другие характеристики приведены в таблице 4.1, где они даны относительно минимального шага квантования Δ_0.

Таблица 4.1 – Характеристики компрессии

№ сегмента	**Кодовая комбинация N сегмента XYZ**	$U_{\text{ЭТ}}^N$	**Шаг квантования Δ_N**	**Сигнал коррекции**
0	000	0	1	0,5
1	001	16	1	0,5
2	010	32	2	1
3	011	64	4	2
4	100	128	8	4
5	101	256	16	8
6	110	512	32	16
7	111	1024	64	32

Максимальное значение входного сигнала 2048 Δ_0, а выходной сигнал имеет 128 положительных и 128 отрицательных отсчетов (всего 256).

Структура кодовой комбинации $A = 87{,}6/13$ имеет вид

P	X	Y	Z	A	B	C	D

где P — знаковый разряд (1 — для положительных значений; 0 — для отрицательных), XYZ — кодовая комбинация N сегмента, D — код номера позиции входного сигнала внутри сегмента.

Так, например, код 00110101 обозначает сигнал с отрицательным значением в сегменте с $N_c = 3$ и позицией внутри сегмента $N = 5$. Значение входного сигнала в соответствии с рисунком и таблицей будет

$$S_{вх} = U_{эт}^{3} + 5 \cdot \Delta_3 = (64 + 5 \cdot 4)\Delta_0 = 84\Delta_0.$$

Поскольку шаг квантования $\Delta_3 = 4$, то код 00110101 будут давать также значения $85\Delta_0$, $86\Delta_0$ и $87\Delta_0$. Ошибка квантования будет меняться от 0 до $3\Delta_0$. Для ее компенсации при декодировании вводится сигнал коррекции, равный половине шага квантования $\Delta_N/2$. В данном примере сигнал коррекции равен $2\Delta_0$.

Операции нелинейного компандирования и экспандирования реализуются в нелинейных кодеках взвешивающего типа. Суть кодирования состоит в последовательном сравнении входного отсчета с набором эталонных напряжений.

Процесс кодирования включает три этапа:

1) формирование знакового символа (такт 1);
2) формирование кода номера сегмента XYZ (такты 2–4), путем сопоставления входного сигнала с эталонными напряжениями сегментов $U_{эт}^{N}$;
3) формирование кода номера позиции внутри сегмента (такты 5–8), когда к эталонному напряжению $U_{эт}^{N}$ добавляются эталонные напряжения, соответствующие позициям внутри сегмента, и происходит их сравнение с входным отсчетом.

3. *Нелинейное кодирование*.

Здесь входной сигнал подвергается равномерному квантованию с большим числом разрядов $n = 12$. Кодер преобразует дискретные амплитудные отсчеты во временной 12-позиционный двоичный код. В цифровом компрессоре этот код преобразуется в 8-разрядный нелинейный код по законам A или μ. Способ преобразования для закона A показан в таблице 4.2.

Основная процедура нелинейного кодирования сводится к следующему:

1) разряд «P», определяющий знак, остается неизменным;
2) все нули после разряда «P», как незначащие, отбрасываются;
3) вместо них вставляется комбинация XYZ, определяющая номер сегмента в двоичном коде;
4) все старшие значащие разряды $ABCD$ переписываются без изменений вслед за символами XYZ;
5) все остальные младшие разряды, помеченные знаком «x», отбрасываются вне зависимости от их значения. Таким образом, ошибка квантования возрастает с номером сегмента.

Таблица 4.2 – Нелинейное кодирование

№ сегмента	Код			
	12-разрядный	8-разрядный		
			XYZ	
0	*P* 0 0 0 0 0 0 0 *A B C D*	*P*	0 0 0	*A B C D*
1	*P* 0 0 0 0 0 0 1 *A B C D*	*P*	0 0 1	*A B C D*
2	*P* 0 0 0 0 0 1 *A B C D x*	*P*	0 1 0	*A B C D*
3	*P* 0 0 0 0 1 *A B C D x x*	*P*	0 1 1	*A B C D*
4	*P* 0 0 0 1 *A B C D x x x*	*P*	1 0 0	*A B C D*
5	*P* 0 0 1 *A B C D x x x x*	*P*	1 0 1	*A B C D*
6	*P* 0 1 *A B C D x x x x x*	*P*	1 1 0	*A B C D*
7	*P* 1 *A B C D x x x x x x*	*P*	1 1 1	*A B C D*

Нелинейное декодирование осуществляется так. По структуре кодовой комбинации *P XYZ ABCD* определяется знак отсчета и номер сегмента (по *XYZ*). Для известного номера сегмента задается эталонное напряжение $U_{\text{ЭТ}N}$, соответствующее нижней границе N сегмента. После этого по известной комбинации *ABCD* определяется положение отсчета внутри сегмента. Наконец, с целью минимизации ошибки квантования добавляется напряжение, равное половине шага квантования в данном сегменте Δ_N. С учетом сказанного, напряжение на выходе декодера можно представить в виде:

$$U_{\text{АИМ}} = \pm\left(U_{\text{ЭТ}}^{N} + (A \cdot 8 + B \cdot 4 + C \cdot 2 + D + 0{,}5)\Delta_N\right),$$

где A, B, C, D принимают значение 0 или 1, а $U_{\text{ЭТ}}^{N}$ и Δ_N для А-компрессора определены ранее. В качестве примера рассмотрим кодирование и декодирование значения АИМ-сигнала:

$$U_{\text{АИМ}} = +934\Delta_0.$$

В двенадцатиразрядном коде оно будет иметь вид:

101110100110

$$\left(+1 \cdot 2^9 + 1 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1\right).$$

В соответствии с таблицей 4.2 номер сегмента $N = 6$ и первый нуль заменяются на 110, следующие за ними четыре значения 1110 остаются, а остальные значения отбрасываются. Восьмиразрядный код принимает вид

P XYZ ABCD

1 1 1 0 1 1 01

При декодировании получим

$$U_{\text{АИМ}} = +512 \cdot \Delta_0 + \left(1 \cdot 8 + 1 \cdot 4 + 0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 + 0.5\right) \cdot 32 \cdot \Delta_0 = \left(512 + 432\right) \cdot \Delta_0 = 944 \cdot \Delta_0.$$

Ошибка при восстановлении составила +10 Δ_0, что меньше половины шага квантования $\Delta_6 = 32$.

4.3 Линейные коды

Преобразование цифрового сигнала к виду, позволяющему передавать его с наименьшими энергетическими затратами, малым уровнем, называется преобразованием к коду передачи, а сами коды — линейными или кодами передачи [1]. Как было отмечено в подразделе 4.1.2, при линейном кодировании желательно убрать постоянную составляющую сигнала и обеспечить условие выделения тактовой частоты для синхронизации.

К таким кодам относятся блочные, биимпульсные коды, коды CMI, МЧПИ и др.

Линейные коды делятся на однополярные и биполярные. Однополярные используются в основном в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), биполярные — в кабельных системах, радиорелейных линиях (РРЛ).

Однополярные коды делятся на NRZ- и RZ-коды:

- NRZ — без возврата к нулю, т. е. значение сигнала не возвращается к нулю за время передачи символа (рис. 4.17).

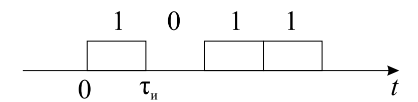


Рис. 4.17 – Код NRZ

- RZ — с возвратом к нулю, т. е. за время передачи символа сигнал меняет свое значение и возвращается к нулю (рис. 4.18).

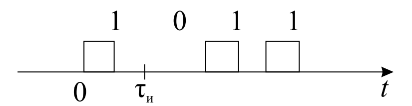


Рис. 4.18 – Код RZ

В кодах RZ полоса частот увеличивается в два раза относительно кодов NRZ, за счет уменьшения длительности импульса $\tau_и$.

Для того, чтобы убедиться в этом, рассмотрим спектры (рис. 4.20) элементарных сигналов, соответствующих NRZ- и RZ-кодам (рис. 4.19).

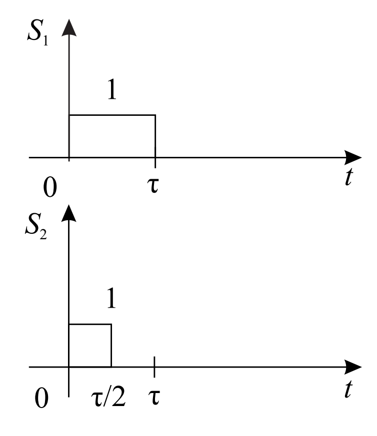
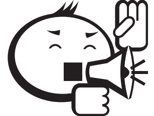


Рис. 4.19 – Элементарные сигналы, соответствующие NRZ- и RZ-кодам

На графике наглядно видно, что спектр NRZ-кода в два раза шире, т. е. NRZ-сигнал занимает полосу частот в два раза больше, чем RZ-сигнал.



К биполярным кодам относятся коды с чередованием полярности импульсов (ЧПИ), т. е. каждый четный импульс меняет полярность.

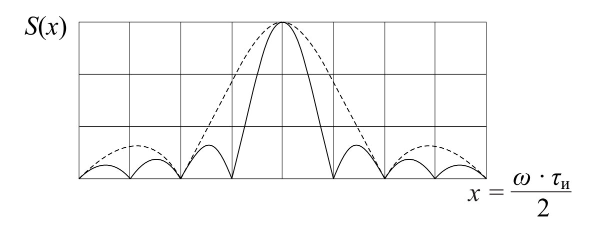


Рис. 4.20 – Спектры элементарных сигналов, соответствующих NRZ(S1) и RZ(S2) кодам

Эти коды бывают также NRZ и RZ:

- NRZ ЧПИ (рис. 4.21).

  Энергетические показатели данного кода и всех биполярных лучше, чем любого из вышерассмотренных, т. к. в сигнале отсутствует постоянная составляющая, однако частота тактовой синхронизации в нем не содержится, что резко ограничивает применимость кода. Этот код не позволяет выделить тактовую частоту.
- RZ ЧПИ (рис. 4.22).

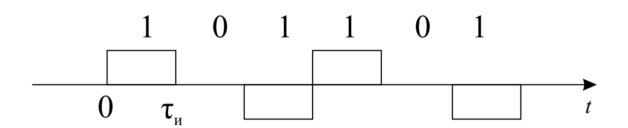


Рис. 4.21 – Код NRZ ЧПИ

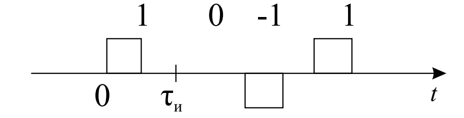


Рис. 4.22 – Код RZ ЧПИ

Он, и ему подобные, чаще всего применяются при передаче цифровых сигналов по электрическим кабелям и РРЛ, поскольку и электрический кабель, и РРЛ легко позволяют передавать отрицательную полярность импульсов.

В кодах ЧПИ для передачи двух символов (1 и 0) используется три состояния (1, 0 и −1), т. е. существует избыточность. Эту избыточность используют для обнаружения ошибок. В соответствии с принятым алгоритмом формирования кода в нем не могут следовать подряд два импульса одной полярности.

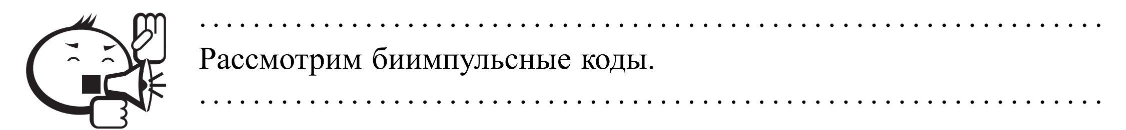
Таблица 4.3 – Код 4В3Т

Сигнал комбинация	**Сочетание уровней передачи**		
	1 вариант	**2 вариант**	**3 вариант**
0 0 0 0	–1 –1 –1	+1 +1 +1	0 –1 +1
0 0 0 1	–1 –1 0	+1 +1 0	–1 +1 0
0 0 1 0	–1 0 –1	+1 0 +1	–1 0 +1
0 0 1 1	0 –1 –1	0 +1 +1	+1 –1 +1
0 1 0 0	–1 –1 +1	+1 +1 –1	0 +1 +1
0 1 0 1	–1 +1 –1	+1 –1 +1	0 –1 0
0 1 1 0	+1 –1 –1	–1 +1 +1	0 0 +1
0 1 1 1	–1 +1 0	+1 –1 0	–1 +1 +1
1 0 0 0	+1 0 –1	–1 0 +1	+1 –1 0
1 0 0 1	0 –1 +1	0 +1 –1	–1 0 –1
1 0 1 0	+1 –1 0	–1 +1 0	+1 0 0
1 0 1 1	–1 0 +1	+1 0 –1	+1 0 +1
1 1 0 0	0 +1 –1	0 –1 +1	–1 –1 0
1 1 0 1	–1 +1 +1	+1 –1 –1	+1 +1 –1
1 1 1 0	+1 +1 –1	–1 –1 +1	0 –1 +1
1 1 1 1	+1 –1 +1	–1 +1 –1	+1 –1 –1

К *биполярным кодам* относятся также блочные коды, но здесь иначе используется избыточность ЧПИ. В качестве примера приведем троичный код 4В3Т (В — *binary*), (Т — *ternary*), когда в трех импульсах передается четыре двоичных символа с использованием специальных кодовых комбинаций (блоков) (см. табл. 4.3).

Нетрудно видеть, что число возможных сочетаний уровней передачи $3^3 = 27$ больше набора кодовых комбинаций $2^4 = 16$ и это обосновывает возможность такой кодировки. Остающаяся избыточность (16 < 27) позволяет реализовать несколько вариантов кода.

Таким образом, вместо каждых четырех импульсов нужно передавать в линию только три. Появляется возможность вместо каждого четвертого импульса цифрового потока передать дополнительные символы, т. е. увеличить объем передаваемой информации и тем самым выиграть в скорости передачи информации.



Здесь каждый символ представляется одним биполярным импульсом (рис. 4.23).

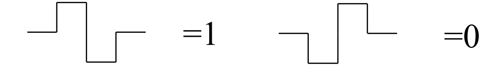


Рис. 4.23 – Символы биимпульсных кодов

Приведем пример абсолютного биимпульсного кода (рис. 4.24).

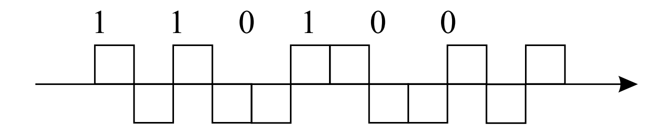


Рис. 4.24 – Абсолютный биимпульсный код

К достоинствам этого кода относятся:

- возможность выделения тактовой частоты;
- отсутствие постоянной составляющей.

А к недостаткам:

- отсутствие избыточности;
- возможность неправильного приема символа, т. к. импульсы отличаются только фазой. Если произойдет случайный «переброс» фазы, то весь сигнал поменяет полярность. Чтобы этого избежать, вводят относительный биимпульсный код. В этом случае приведенная выше последовательность будет выглядеть так, как показано на рис. 4.25.

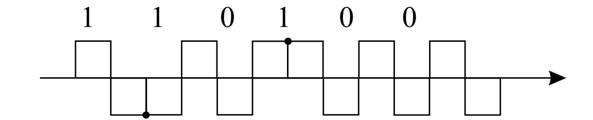


Рис. 4.25 – Относительный биимпульсный код

При этом принятый импульс считается единицей, если произошла смена фаз, и нулем — если нет. Рассмотрим спектр биимпульсного сигнала (рис. 4.26).

Из графика видно, что в данном сигнале отсутствует постоянная составляющая. А так как именно постоянная составляющая требует большой мощности, то можно сделать вывод, что данный сигнал наиболее экономичен с точки зрения энергетики. К тому же отсутствие постоянной составляющей уменьшает такой отрицательный фактор, как дрейф нуля.

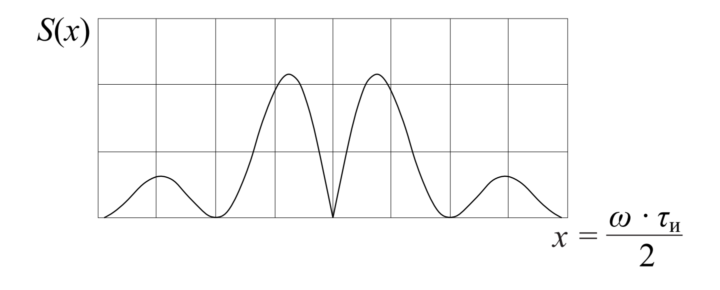


Рис. 4.26 – Спектр биимпульсного сигнала

Коды CMI — это сочетание ЧПИ и биимпульсных кодов. Так же как в NRZ, в ЧПИ происходит изменение полярности каждого четного единичного импульса, но при этом еще происходит замена нуля одним биполярным импульсом, как в биполярных кодах. При этом последовательность, приведенная при рассмотрении биимпульсных кодов, будет такой, как показано на рис. 4.27, и нулю соответствует биполярный импульс.

На практике часто применяют *МЧПИ коды* (модифицированный ЧПИ). Причиной их создания стала проблема выделения тактовой частоты при появлении в кодовой комбинации нескольких нулей подряд. В этих кодах вместо нулей добавляются определенные кодовые комбинации, которые удаляются после выделения тактовой частоты. Для того чтобы они легко удалялись, необходимо, чтобы они сбивали привычное чередование импульсов. Примером такого кода является код *HDB-3*. Число 3 здесь указывает на то, что допускается количество нулей не больше трех.

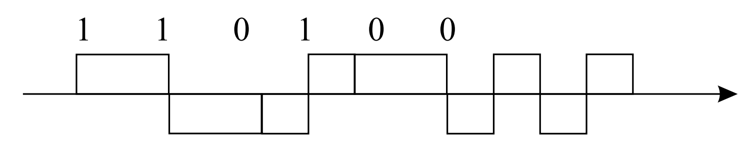


Рис. 4.27 – Код CMI

Комбинация 0000 заменяется на комбинацию 000V или B00V, где «B» и «V» = = +(−)1. Рассмотрим правила составления этого кода:

1. Полярность «B» всегда противоположна полярности предыдущего импульса, а полярность «V» — совпадает.
2. Если число единиц в предыдущей пачке четное, то вводится B00V, если нечетное — 000V. Под пачкой понимается последовательность импульсов между двумя паузами с числом нулей больше трех.

Например, двоичная комбинация, показанная на рис. 4.28.

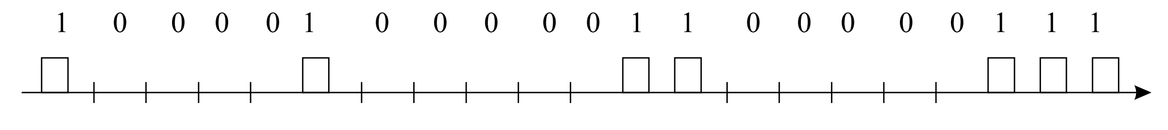


Рис. 4.28 – Двоичная комбинация

После применения к ней описанного правила код приобретет вид, показанный на рис. 4.29.

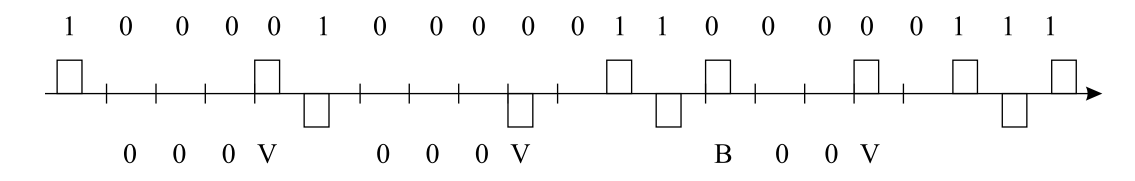


Рис. 4.29 – МЧПИ код

4.4 Синхронизация в ЦСП

В системах с ВРК принципиальным является четкое соблюдение временных соотношений импульсных последовательностей как на передающем, так и на приемном концах группового тракта. Под этим понимается:

- выполнение условий равенства тактовых частот принимаемого сигнала (передатчика) и тактового генератора приемника (частотный синхронизм)
  $f_{\text{т пер}} = f_{\text{т пр}}$;
- совпадение момента начала анализа каждого импульса принимаемой последовательности с моментом начала импульса тактового генератора приемника (фазовый синхронизм)
  $\varphi_{\text{т пер}} = \varphi_{\text{т пр}}$.
  Эти два условия тактовой синхронизации иллюстрируются рис. 4.30 и 4.31.
- четкое определение начала группового сигнала (начала цикла), что позволяет идентифицировать и выделить каждый канал из группы.

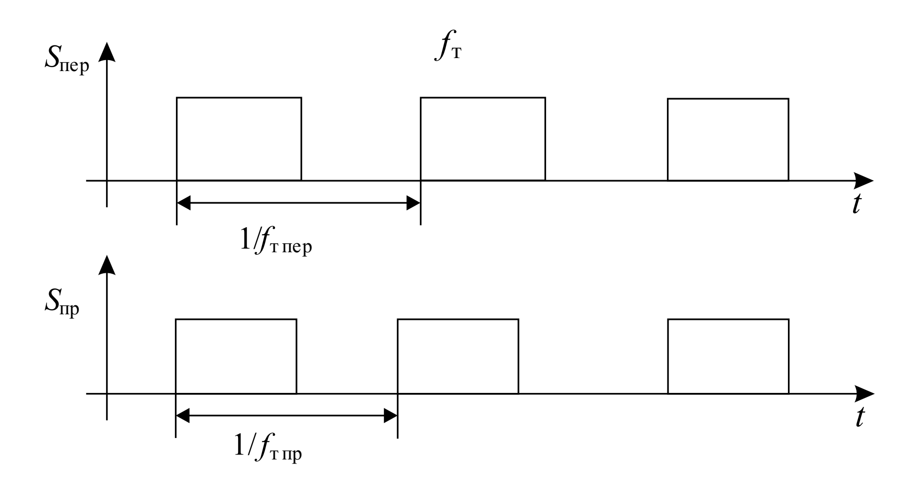


Рис. 4.30 – Нарушение частотного синхронизма

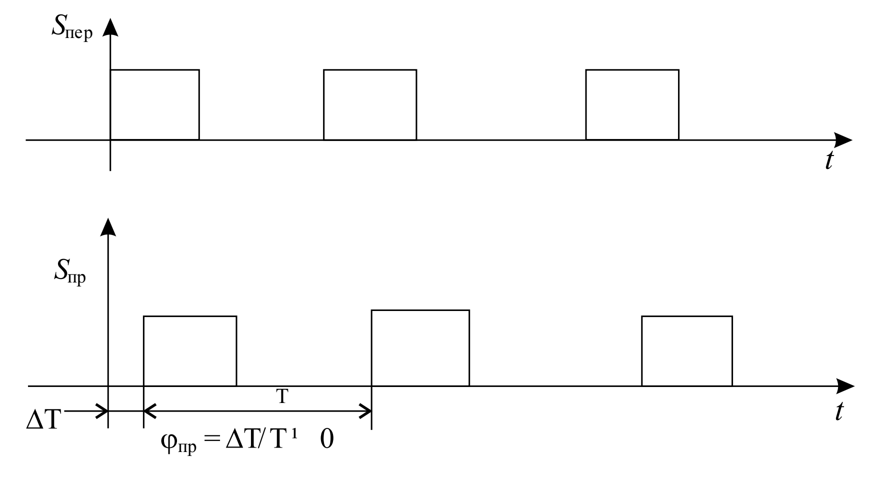


Рис. 4.31 – Нарушение фазового синхронизма

Таким образом, при формировании группового сигнала и разработке аппаратуры ЦСП должны закладываться условия тактовой и цикловой синхронизации. На рис. 4.32 приведена структура группового сигнала ЦСП. Здесь закодированный дискретный отсчет каждого канала, размером в 8 бит, организует канальный интервал КИ. За один цикл Ц передаются отсчеты из N каналов. Однако помимо циклов

групповой сигнал содержит еще и M сверхциклов. Необходимость их введения объясняется следующим. Вместе с информационными байтами в групповом сигнале передаются и сигналы управления и взаимодействия (СУВ). Это сигналы вызова, набора номера и т. п. от каждого абонента. Передавать все N СУВ в каждом цикле нет необходимости, так как эти сигналы медленные по сравнению с информационными. Поэтому передачу СУВ организуют не со скоростью 8 кГц, а с меньшей скоростью, так что за время каждого цикла (125 мкс) передают отсчеты только двух из 30 каналов. Всего для передачи всех СУВ нужно $M = (N/2) + 1$ циклов. Один дополнительный цикл нужен для обозначения начала передачи СУВ. Длительность сверхцикла $\tau_{сц} = M\ \tau_{ц}$. Итак, для организации работы ЦСП необходимы тактовая (ТС), цикловая (ЦС) и сверхцикловая (СЦС) синхронизации.

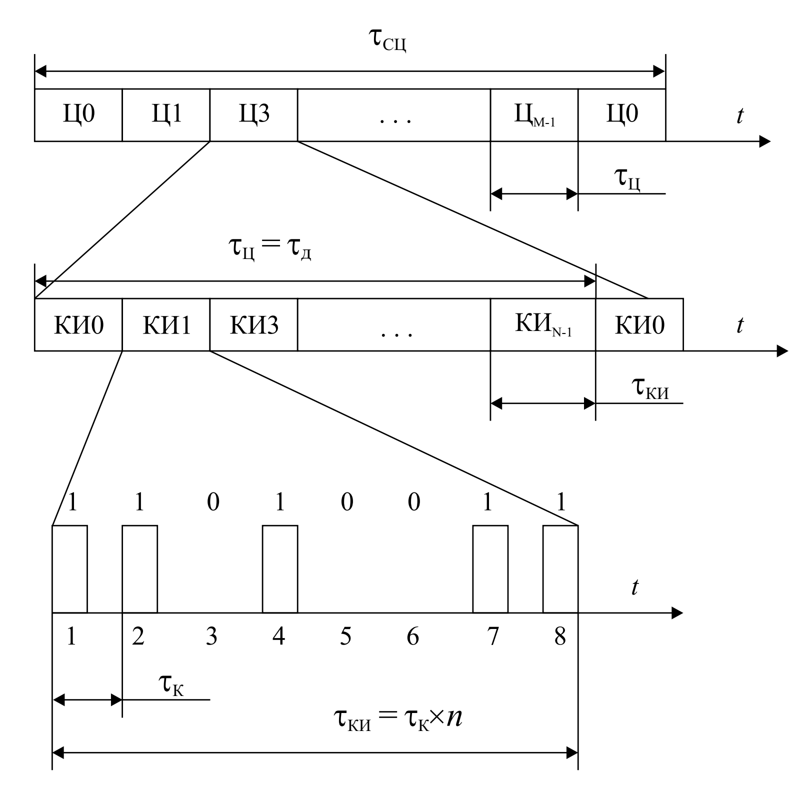


Рис. 4.32 – Структура группового сигнала ЦСП

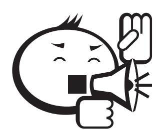
4.4.1 Тактовая синхронизация



Основное назначение тактовой синхронизации — обеспечение темпа передачи и согласование скоростей передачи и приема информации. Нарушение тактовой синхронизации приводит к увеличению вероятности ошибок приема, срыву ЦС и СЦС, прекращению работы ЦСП.

Рассмотрим способы реализации ТС. Они делятся на две группы: 1 — резонансные; 2 — с использованием фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В свою

очередь, резонансные устройства ТС бывают с передачей специальных сигналов и с использованием рабочих символов, т. е. импульсных последовательностей группового сигнала. Последний способ носит название — выделение тактовой частоты (ВТЧ). Он является наиболее распространенным в устройствах тактовой синхронизации.



Рассмотрим алгоритм и принцип действия резонансного устройства выделения тактовой частоты (УВТЧ). Как известно из раздела 4.3, в сигнале ЧПИ, или МЧПИ, который передается в тракте ЦСП, не содержится тактовая частота (рис. 4.33). В однополярном двоичном сигнале такая дискретная частота есть. Таким образом, алгоритм ВТЧ представляет собой: ЧПИ (МЧПИ) → двоичный сигнал → фильтр → формирователь импульсов.

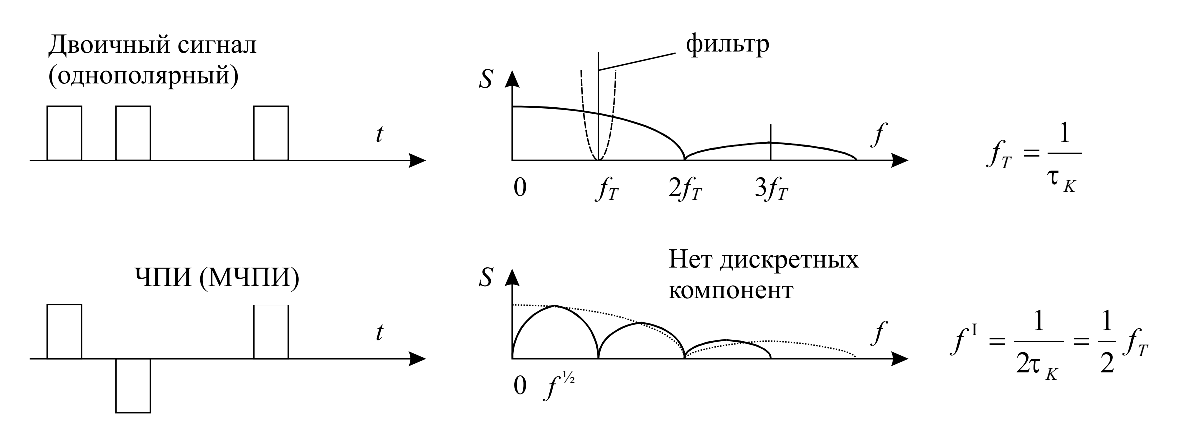


Рис. 4.33 – Спектры цифровых сигналов

Блок-схема УВТЧ, работающего в соответствии с этим алгоритмом, представлена на рис. 4.34. Здесь входной сигнал вначале усиливается усилителем, затем сигнал ЧПИ с помощью двухполупериодного выпрямителя преобразуется в однополярный цифровой сигнал. Тактовые импульсы получаются после фильтрации сигнала в резонансном фильтре, настроенном на тактовую частоту f_T, и прохождения гармонического сигнала через формирователь.

Резонансные УВТЧ широко применяются в оконечной приемной аппаратуре ЦСП, в регенераторах. Основным недостатком резонансных УВТЧ является нестабильность тактовой частоты. Причина этой нестабильности иллюстрируется рис. 4.35.

Здесь изображены сигналы на входе (*а*) и на выходе (*б*) фильтра. Моменты выделения тактовой частоты определяются пороговым напряжением $S_{\text{пор}}$. При нарастании и спаде амплитуды гармонического сигнала эти моменты τ_1, τ_2, τ_3 и др. не будут строго периодичны, что и приводит к нестабильности тактовой синхронизации и даже к ее срыву. Для устранения этой причины и применяют коды МЧПИ, HDB-3 и другие, которые не допускают в импульсных последовательностях большого количества нулей, следующих подряд.

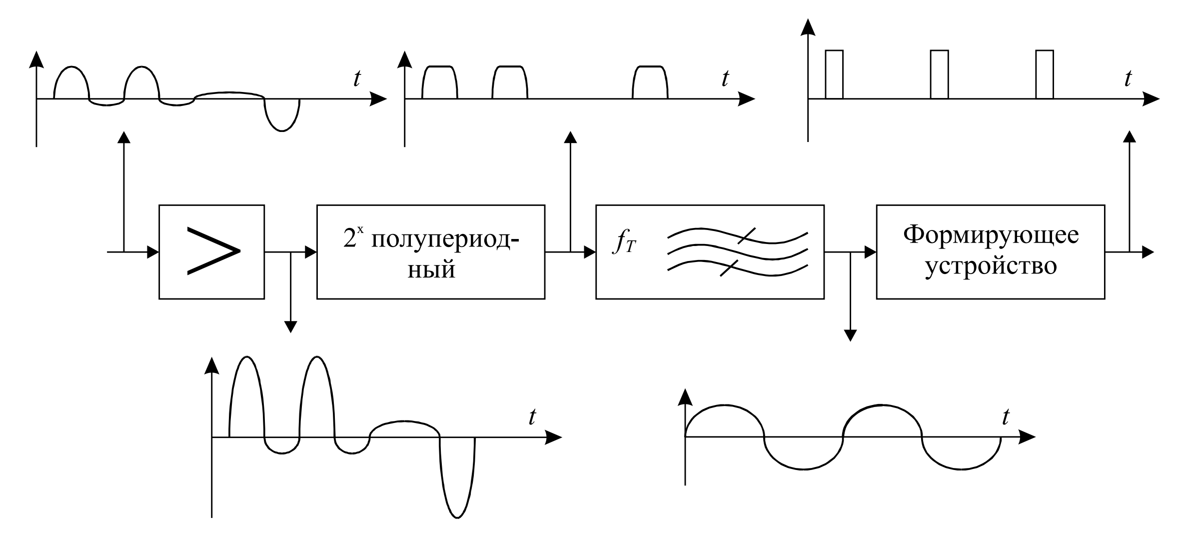


Рис. 4.34 – Блок-схема резонансного УВТЧ

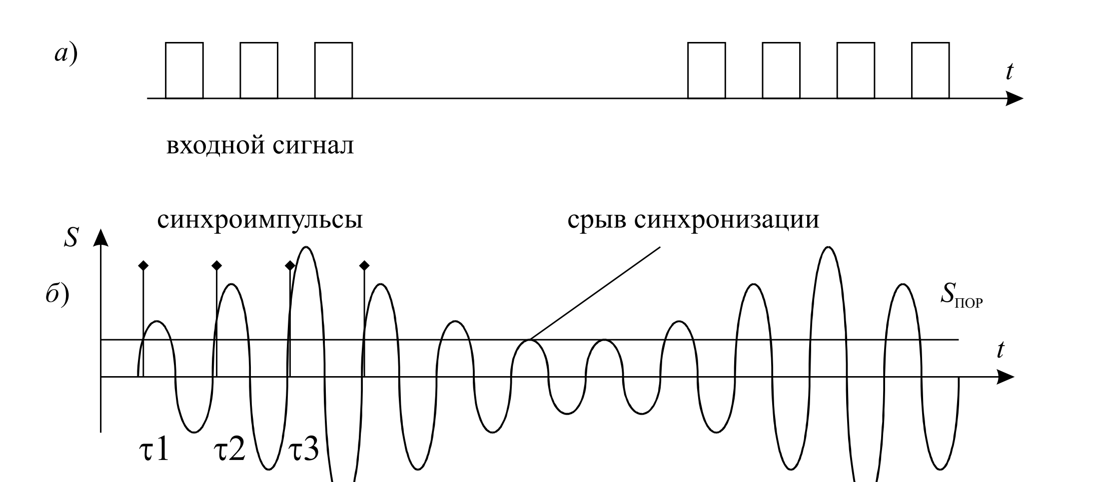


Рис. 4.35 – Процесс выделения тактовой частоты

Схема УВТЧ с ФАПЧ приведена на рис. 4.36. Здесь тактовые импульсы вырабатываются управляемым генератором ГТЧ, который подстраивается с помощью фазового детектора под тактовую частоту входного сигнала.

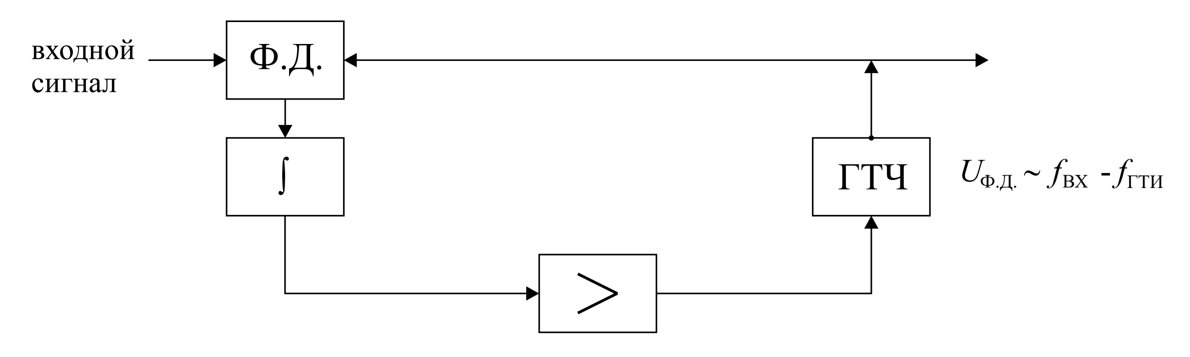


Рис. 4.36 – Блок-схема УВТЧ с ФАПЧ

Амплитуда импульсов на выходе фазового детектора пропорциональна разности частот ГТЧ и входного сигнала. Для сглаживания управляющего напряжения и плавной регулировки в устройстве применен интегратор.

Непосредственное воздействие управляющего устройства на ГТЧ обладает существенным недостатком — невысокой точностью синхронизации. Причина заключается в низкой стабильности частоты управляемого ГТЧ. Для устранения этого недостатка используют схему ФАПЧ без непосредственного воздействия управляющего устройства на частоту ГТЧ (рис. 4.37).

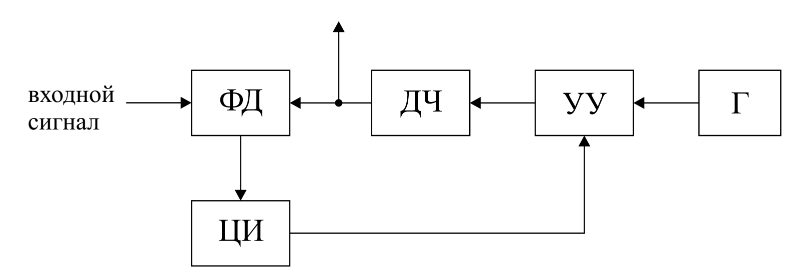


Рис. 4.37 – Схема УВТЧ с ФАПЧ без непосредственного воздействия на генератор

Здесь частота генератора в m раз больше f_T, и управление ею осуществляется с помощью устройства управления УУ, которое из импульсной последовательности исключает или добавляет к ней импульсы в соответствии с состоянием цифрового интегратора (реверсивного счетчика (ЦИ). Делитель частоты ДЧ уравнивает частоты входного и опорного сигнала. При процедуре деления эффект нерегулярности следования импульсов от УУ за счет добавления или исключения сглаживается, а эффект регулирования тактовой частоты остается.

4.4.2 Цикловая синхронизация

Цикловая синхронизация отвечает за распределение канальных интервалов, определяя их начало и последовательность. При нарушении ЦС начало цикла в приемнике смещается относительно истинного положения (рис. 4.38).

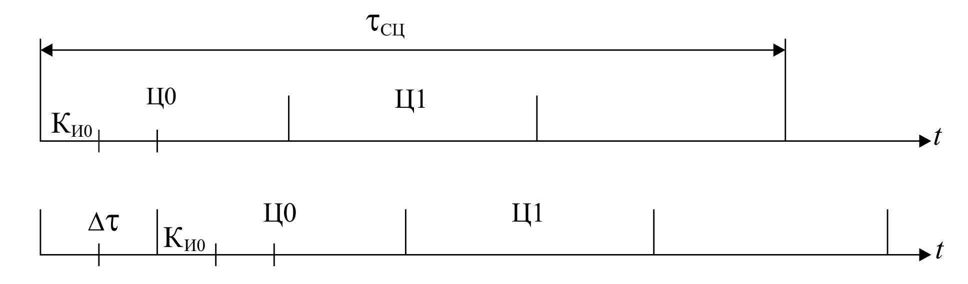
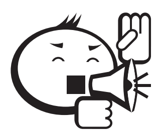


Рис. 4.38 – Нарушение ЦС

В этом случае возможна потеря связи по всем каналам, переадресация абонентов, нарушение СЦС.



Для организации ЦС используется специальный многоразрядный синхросигнал, который помещается в начало цикла (рис. 4.39).

Для надежной работы ЦС важную роль играют два его свойства:

- сложность кодовой комбинации;
- периодичность.

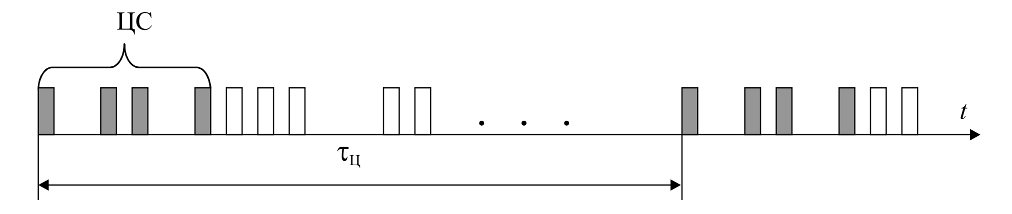


Рис. 4.39 – Организация ЦС

Первое из них обеспечивает высокую помехоустойчивость, так как случайное возникновение кодовой комбинации циклового синхросигнала в поле информационных символов хоть и возможно, но маловероятно. Но даже если такая ситуация случайно возникает, то возможность ложного срабатывания устраняется благодаря свойству периодичности. ЦС срабатывает только тогда, когда синхросигнал повторяется несколько раз с периодом, равным $T_Ц$.

Для формирования циклового синхросигнала применяются стандартные генераторы импульсных последовательностей. Приемник синхросигнала имеет более сложную структуру (рис. 4.40). В его составе три узла: опознаватель, анализатор и решающее устройство.

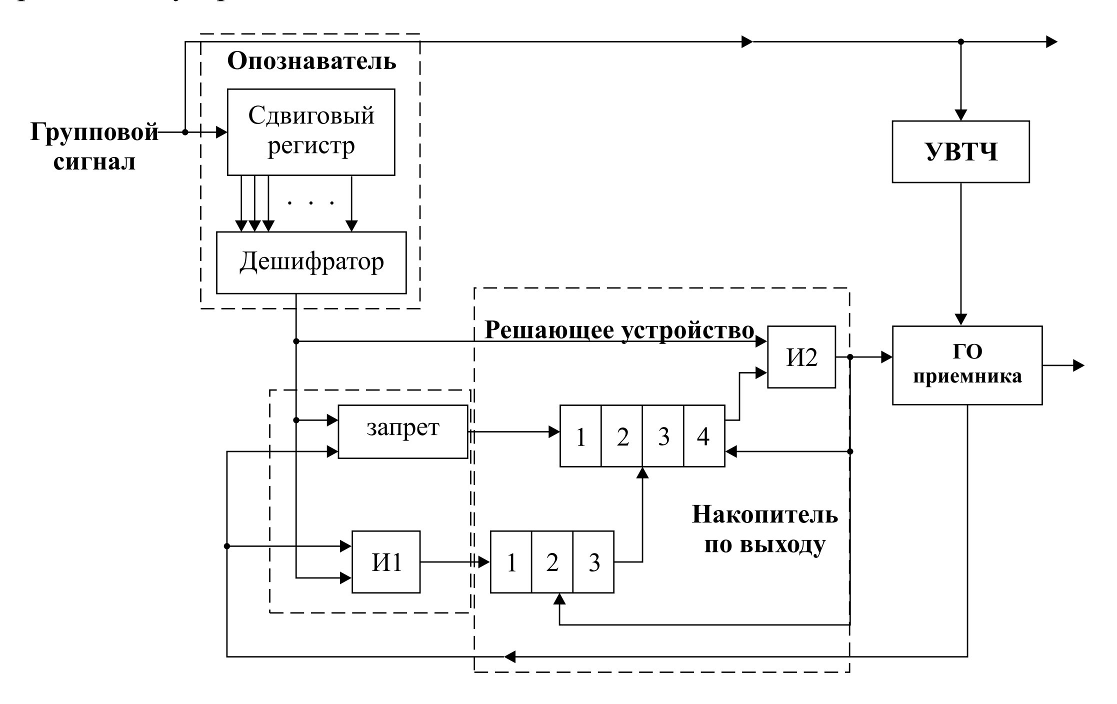


Рис. 4.40 – Структурная схема приемника синхросигнала

Опознаватель состоит из сдвигового регистра и дешифратора. Сдвиговый регистр постоянно заполняется символами группового сигнала. Когда комбинация ЦС (например 0011011) целиком наполняет разряды регистра, дешифратор срабатывает и его выходной сигнал поступает на анализатор и на решающее устройство.

Анализатор содержит два параллельных блока анализа:

- реакция на совпадение цикловых синхроимпульсов опознавателя и генераторного оборудования (ГО). Это — схема И1, которая выдает импульс на выходе, когда моменты прихода входных импульсов совпадают;
- реакция на несовпадение импульсов опознавателя и ГО — схема НЕ.

Решающее устройство содержит два накопителя: по входу в синхронизм (3–4 элемента накопления) и по выходу из синхронизма (4–6 элементов накопления) и схему совпадения И2. Решающее устройство в стандартной ситуации, когда цикловой синхронизм соблюдается, на выходе схемы И2 не выдает никакого сигнала. В этом случае работа ЦСП всецело определяется блоком генераторного оборудования. Этот блок запускается и синхронизируется от УВТЧ. На многочисленных выходах ГО выдаются импульсы распределения по разрядам внутри канального интервала, распределения по КИ и, наконец, импульсы распределения по циклам.

В стандартной ситуации установившегося циклового синхронизма цикловые импульсы ГО и синхроимпульсы опознавания совпадают во времени. На выходе схемы «НЕ» сигнала нет и на вход накопителя по выходу ничего не поступает. На выходе схемы «И1» подается импульс, который заполняет первый разряд накопителя. Так будет повторяться три раза, пока накопитель по входу не наполнится. При заполнении на выходе накопителя по входу появляется импульс, назначение которого сбросить (обнулить) все разряды накопителя по выходу. В нашем случае этот накопитель и так пуст. Таким образом, на выходе схемы И2 нет сигнала.

Рассмотрим теперь некоторые возможные ситуации нарушения ЦС (рис. 4.41).

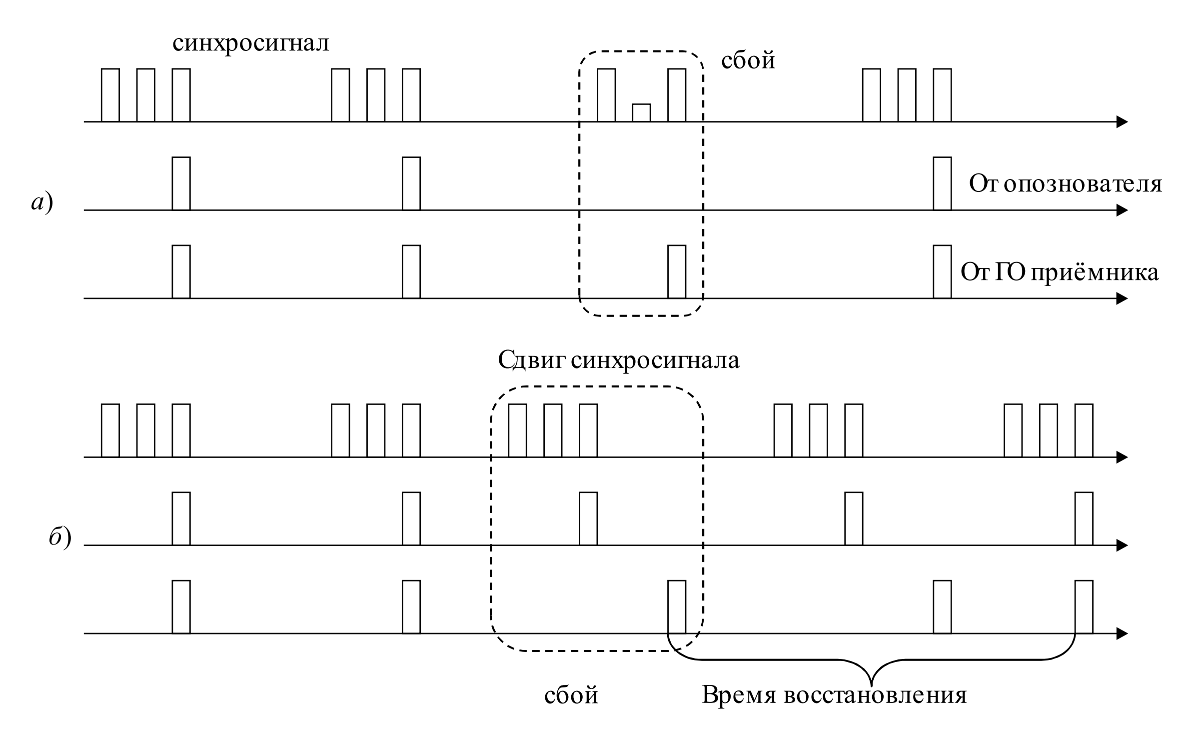


Рис. 4.41 – Нарушение цикловой синхронизации:
а) нарушен синхросигнал; *б*) сдвиг синхросигнала

Предположим, что нарушена структура синхросигнала, тогда на выходе дешифратора импульс будет отсутствовать, однако ГО будет работать. Сбоя синхронизации не будет. Если ситуация, приведенная на рис. 4.41, *а*, повторится четыре

раза и заполнится накопитель по выходу, то в этом случае на выходе И2 появится импульс, который приведет ГО в режим поиска (вхождение в синхронизм).

При сдвиге синхросигнала сбой будет периодическим и в этом случае генераторное оборудование будет осуществлять перестройку по задержке и вхождение в синхронизм.

4.5 Формирование группового сигнала

Рассмотрим сложившиеся к настоящему времени системы с временным группообразованием [1].

4.5.1 Межсимвольные искажения

Процесс объединения цифровых сигналов различных каналов, как уже отмечалось в разделе 4.1, заключается в размещении импульсов последовательно во времени друг за другом (рис. 4.42). Идеальная последовательность (рис. 4.42, *а*) на практике не реализуется, так как полоса пропускания системы передачи ограничена и форма импульса искажается (рис. 4.42, *б*).

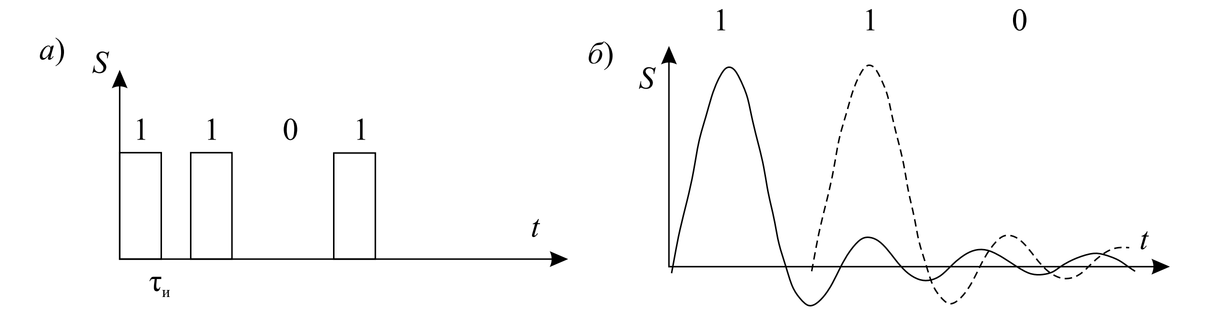


Рис. 4.42 – Цифровой сигнал при объединении каналов

Эти искажения связаны с подавлением высокочастотных составляющих спектра (искажение первого рода) и подавлением низкочастотных составляющих (искажения второго рода). Искажения первого рода приводят к смещению импульса, увеличению его длительности и уменьшению амплитуды. Искажения второго рода вызывают спад плоской вершины и появление длинных «хвостов», следующих за основным импульсом. Наибольшую неприятность при формировании и объединении цифровых потоков представляет расширение импульса и появление «хвостов», поскольку эти процессы приводят к возникновению межсимвольных искажений или «межсимвольный интерференции», когда сигнал из одного временного интервала попадает в соседний и может привести там к смене состояния (0→1 или 1→0).

Для подавления межсимвольных искажений разработано много способов, наиболее распространенными из которых являются:

1. Применение сигналов без постоянной составляющей (ЧПИ, HDB-3, биимпульсные коды и др.). В этом случае происходит существенная компенсация низкочастотных искажений (рис. 4.43).

2. Фильтрация сигнала с целью подавления боковых лепестков импульсной характеристики.

Поскольку полоса пропускания системы передачи Δf ограничена, ее импульсная характеристика будет иметь вид (рис. 4.44). Ширина полосы пропускания главного лепестка и уровень боковых лепестков функции $g(t)$ зависят от формы амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра.

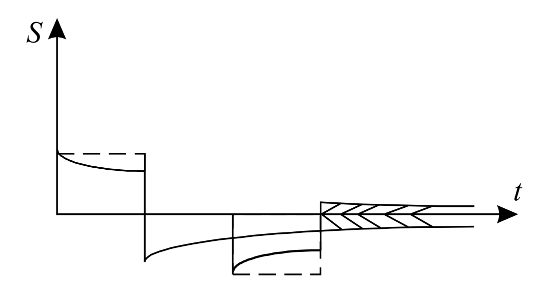


Рис. 4.43 – Подавление искажений второго рода в биполярных сигналах

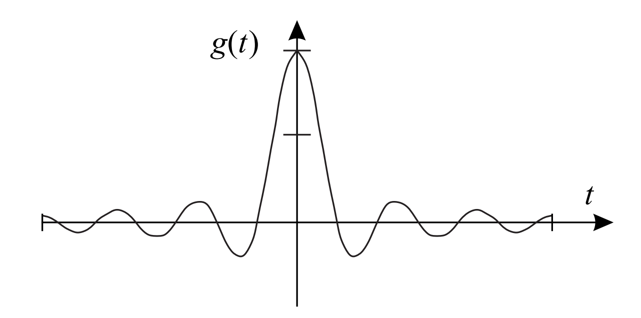


Рис. 4.44 – Импульсная характеристика фильтра с ограниченной полосой пропускания

Для идеального фильтра с прямоугольной АЧХ импульсная характеристика будет определяться преобразованием Фурье от $K(\omega)$ (рис. 4.45).

$$\left|K(\omega)\right| = \begin{cases} K_0 & |\omega| \leqslant \omega_B \\ 0 & |\omega| > \omega_B \end{cases}, \qquad y(t) = \frac{K_0\omega_B}{\pi}\,\frac{\sin \omega_B t}{\omega_B t}.$$

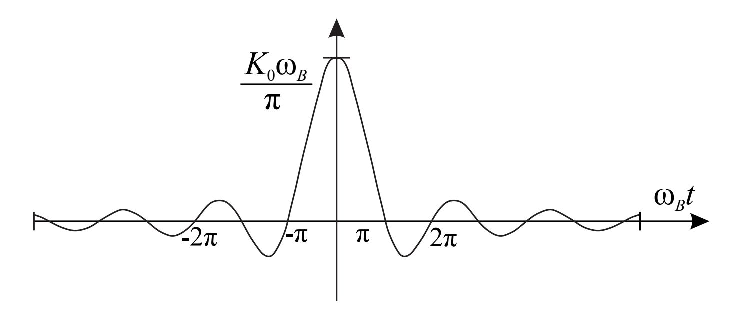


Рис. 4.45 – Импульсная характеристика идеального фильтра

Ширина главного лепестка по нулевому уровню будет равна:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_B} = \frac{1}{f_B},$$

а отношение уровня первого бокового лепестка к главному составляет 0,213.

С целью снижения уровня боковых лепестков функции $g(t)$ скаты частотной характеристики делают пологими. Так, например, для фильтров типа Хемминга

$$K(\omega)=\begin{cases}K_0(0{,}54)+0{,}46\cos\dfrac{\pi}{2}\dfrac{\omega}{\omega_B} & |\omega|\leqslant\omega_B;\\ 0 & |\omega|\leqslant\omega_B.\end{cases}$$

Уровень первого бокового лепестка $g(t)$ снижается до 0,006.

3. Применение фильтров Найквиста.

Эти фильтры имеют АЧХ типа

$$K(\omega)=\begin{cases}1 & 0\leqslant\omega\leqslant(1-\alpha)\omega_B;\\ \cos^2\left[\dfrac{\pi}{4\alpha\omega_B}\big(\omega-(1-\alpha)\omega_B\big)\right] & (1-\alpha)\omega_B\leqslant\omega\leqslant(1+\alpha)\omega_B;\\ 0 & (1+\alpha)\omega_B<\omega.\end{cases}$$

Характеристики фильтров Найквиста для разных значений параметра α, определяющего крутизну скатов АЧХ, приведены на рис. 4.46.

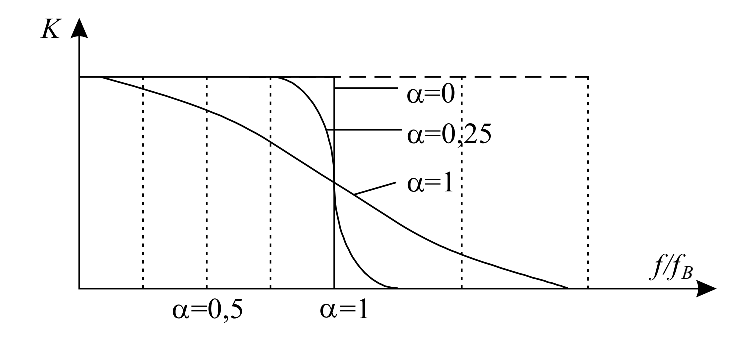


Рис. 4.46 – АЧХ фильтров Найквиста

Импульсная характеристика фильтра

$$g(t)=\frac{\sin\omega_B t}{\omega_B t}\left[\frac{\cos\alpha\omega_B t}{1-\left(\dfrac{2\alpha\omega_B t}{\pi}\right)^2}\right]$$

имеет вид (рис. 4.47), где $\tau=\pi/\omega_B$, и определяет частоту взятия отсчетов.

Импульсная характеристика имеет следующие особенности:

1) боковые лепестки быстро затухают;
2) в моменты $t=n\tau_д$ значения $g(t)$ равны нулю.

Работа цифровых систем передачи с фильтром Найквиста организуется так. Дискретные отсчеты в виде коротких импульсов с интервалом $\tau_д$ подаются на фильтр, на выходе которого появляются отклики $g(t-k\tau_д)$ (рис. 4.48, *а*). Сумма этих откликов (рис. 4.48, *б*) представляет собой сложный по форме аналоговый сигнал.

Особенностью суммарного сигнала является то, что в моменты $t=k\tau_д$ его значения соответствуют значениям передаваемых отсчетов. Поэтому суммарный сигнал

модулируется, например с помощью однополосной амплитудной модуляции, и передается по каналу связи. На приемном конце после детектирования выделяются выборки в моменты времени $t = k\tau_д$. Разумеется, что работа такой ЦСП существенно зависит от точности синхронизации и влияния шумов и помех.

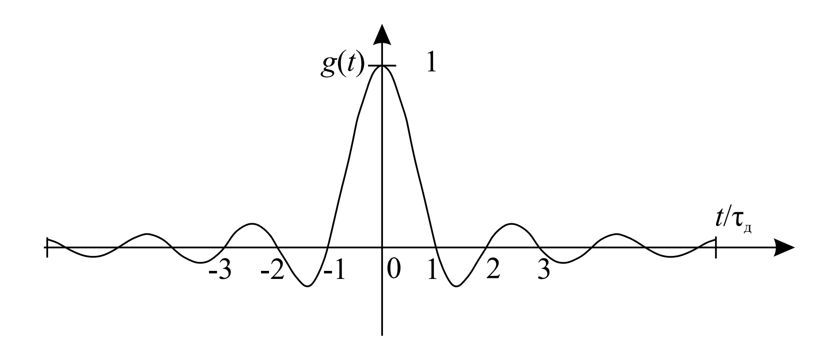


Рис. 4.47 – Импульсная характеристика идеального фильтра Найквиста

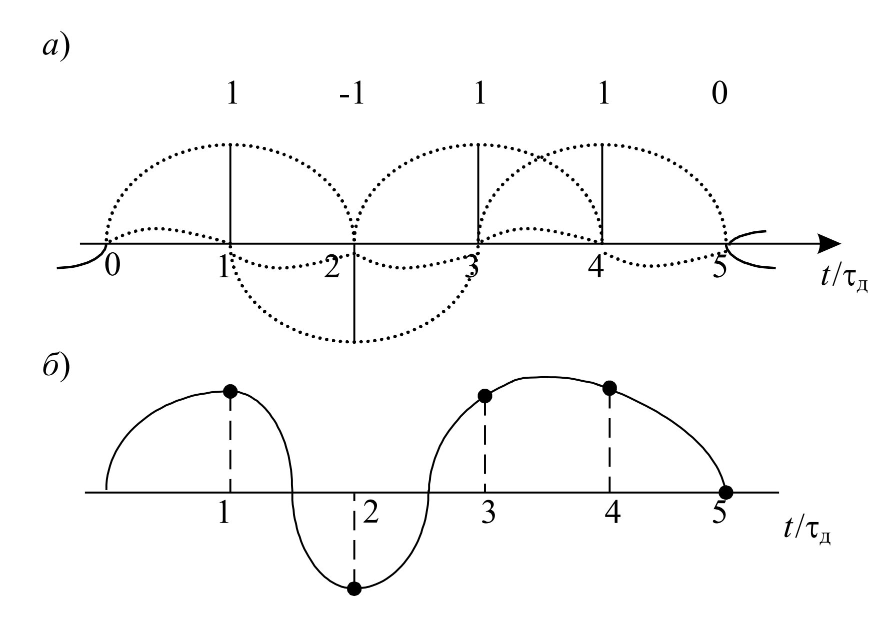
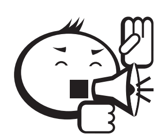


Рис. 4.48 – Работа ЦСП с фильтром Найквиста

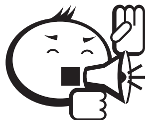
В современных ЦСП применяются все эти методы, хотя в проводных системах традиционно используются биполярные сигналы, а в системах с радиоканалами — комбинации всех, поскольку эффективность использования частотного диапазона здесь стоит особенно остро.

4.5.2 Первичный цифровой сигнал (ИКМ-30)

В ЦСП групповой сигнал формируется в виде цикла. Длительность цикла $\tau_ц$ равна времени дискретизации $\tau_д$, которое равно 125 мкс. В пределах цикла передается информация от N каналов и служебная информация (сигналы синхронизации, сигнализации и др.). Число N может быть различным. Так, в системе ИКМ-30/32 (стандарт ITU-T G.703) 30 информационных и 2 служебных канала, а в системе ISDN BRI $N = 3$, где два информационных канала 64 кб/с и один служебный 16 кб/с.



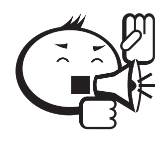
Основным цифровым каналом (ОЦК) является канал со скоростью передачи 64 кб/с.



Информация в этом канале в виде одного байта (восемь бит) передается с частотой повторения 8 кГц. Таким образом, скорость передачи информации в ОЦК составляет 64 кб/с.

Время передачи байта составляет $\tau_ц/N$. Для ИКМ-30/32 это время равно 125 мкс/32 = 3,9 мкс. Поскольку для надежного выделения тактовой частоты длительность импульса $\tau_и$ должна быть в 2 раза меньше длительности битового интервала $\tau_б$ (3,9/8 = 0,48 мкс), то

$$\tau_и = \frac{125\ \text{мкс}}{2 \cdot 8 \cdot 32} = 0{,}24\ \text{мкс}.$$



Рассмотрим систему ИКМ-30 подробнее.

Временной план (или, как говорят, временной спектр) ЦСП ИКМ-30 приведен на рис. 4.49.

Здесь цикл передачи содержит 32 канальных интервала (КИ), в которых передается информация абонентов ($КИ_1$–$КИ_{15}$; $КИ_{17}$–$КИ_{31}$) и служебная информация ($КИ_0$ и $КИ_{16}$). Назначение битов в байте канального интервала определяется номером позиции бита P_n ($n = 1-8$). Для абонентских каналов на позициях P_n передается 0 или 1 в зависимости от содержания информации, а кодовая комбинация, содержащаяся в байте, определяет значение отсчета в данном канале в данный момент времени.

Основное назначение $КИ_{16}$ — передача сигналов управления и взаимодействия (СУВ) или сигнализации. К ним относятся сигналы: «Запрос», «Ответ», «Набор номера», «Занято» и др. Длительность этих сигналов значительно больше длительности цикла. Поэтому их не обязательно передавать в каждом цикле и по этой причине вводятся сверхциклы, которые объединяют несколько циклов. В системе ИКМ-30 в одном цикле передаются СУВ, только для двух каналов с номерами i и $i + 15$, где $i = 1 \div 15$. Для передачи отводится по четыре позиции P_1–P_4 и P_5–P_8, однако на практике используется только две P_1–P_2 и P_5–P_6, а остальные остаются для свободного использования.

Примеры заполнения битовых позиций для некоторых сигналов при передаче от абонента к АТС приведены в таблице 4.4.

Поскольку длительность сверхцикла $\tau_{сц} = 16 \cdot \tau_ц = 16 \cdot 125$ мкс = 2 мс, то время передачи каждого импульса 50 мс вполне достаточно для надежного набора номера.

Так как циклы должны быть пронумерованы и иметь периодичность передачи и приема, в первом цикле с номером $Ц_0$ передается сигнал сверхцикловой синхро-

низации (СЦС), сформированный четырьмя нулями на позициях P_1–P_4. В случае потери сверхцикловой синхронизации на позиции P_6 передается сигнал «Авария СЦС». Остальные три разряда свободны. Отсюда можно сделать вывод, что число циклов в сверхцикле $M = N/2 + 1$, где M — число информационных каналов.

Таблица 4.4 – Сигналы управления и взаимодействия

№		**Сигнал**		**Применение**
		$P_1(P_5)$	$P_2(P_6)$	
1	Занятие	1	0	
2	Набор номера Импульс Пауза Межцифровой интервал	 0 1 1	 0 0 0	} Время передачи импульса 50 мс Длительность интервала 700 мс
3	Разъединение	1	1	

В канальном интервале КИ$_0$ на позициях P_2–P_8 передается цикловый синхросигнал 8 раз за сверхцикл только в четных циклах. Позиция P_1 предназначена для передачи дискретной информации для служебного или коммерческого пользования.

В нечетных циклах в КИ$_0$ на позиции P_3 передается сигнал аварии цикловой синхронизации, а на позиции P_6 — сигнал, регистрирующий увеличение коэффициента передачи в ЦСП, близкий к порогу самовозбуждения и предписывающий ввести остаточное затухание. Остальные позиции в КИ$_0$ свободны.

Свободные позиции были отведены для передачи дополнительной служебной информации производителями оборудования и операторами связи по своему усмотрению. Такой информацией может быть:

- потеря тактовой синхронизации;
- потеря цифрового сигнала;
- низкая помехоустойчивость (коэффициент ошибок больше пороговой величины $P_{\text{ош}} > 10^3$, $P_{\text{ош}} > 10^5$) и другая.

Система ИКМ-30 может быть использована не только для передачи телефонных сигналов, но и для передачи данных, когда часть канальных интервалов отводится для этих целей. В предельном случае во всех канальных интервалах, кроме КИ$_0$, передается дискретная информация с максимальной скоростью 1984 кб/с.

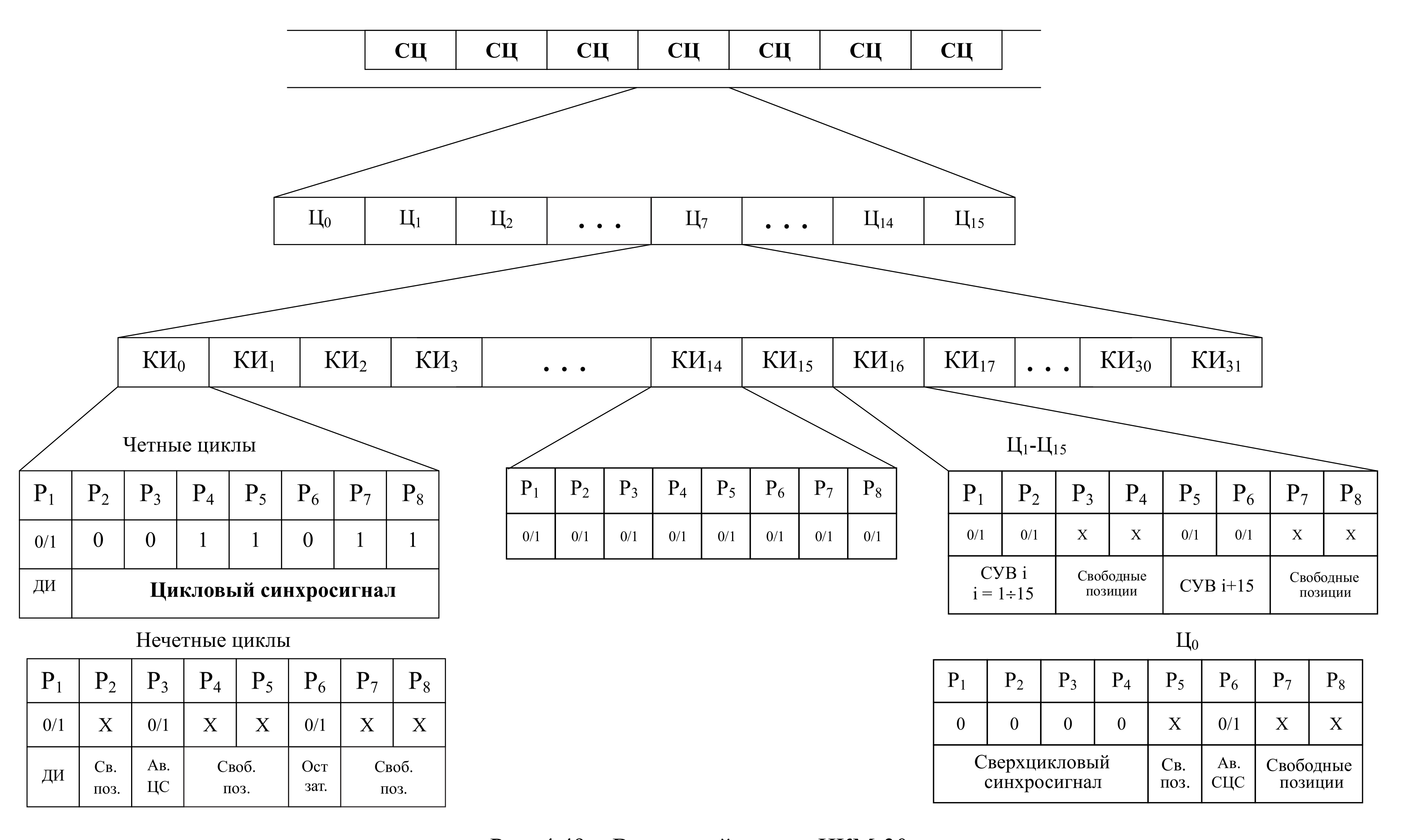


Рис. 4.49 – Временной спектр ИКМ-30

4.6 Шумы и помехи в цифровых системах передачи

В ЦСП на передачу информации влияют те же виды шумов и помех, что и в аналоговых системах (см. раздел 3): тепловые и дробовые шумы, переходные помехи в многопарных электрических кабелях, атмосферные и промышленные помехи. Специфика ЦСП заключается в том, что роль нелинейных помех, очень существенных в АСП, здесь практически сводится к нулю, так как при временном разделении каналов одновременное существование сигналов различных частот исключается.

Вместе с тем в ЦСП появляются новые виды шумов и помех, которые необходимо учитывать [3, 18]. К таким дополнительным шумам относятся шумы дискретизации, шумы квантования, шумы незагруженного канала, шумы ограничения и дополнительные переходные помехи, связанные с искажением формы импульсов принимаемых сигналов.

В результате дискретизации мы получаем сигнал с АИМ. Система с АИМ преобразуется в систему с ИКМ, если добавить АЦП на передающей стороне и ЦАП на приемной. Процессы дискретизации и квантования изображены на рис. 4.50 *а*, *б*.

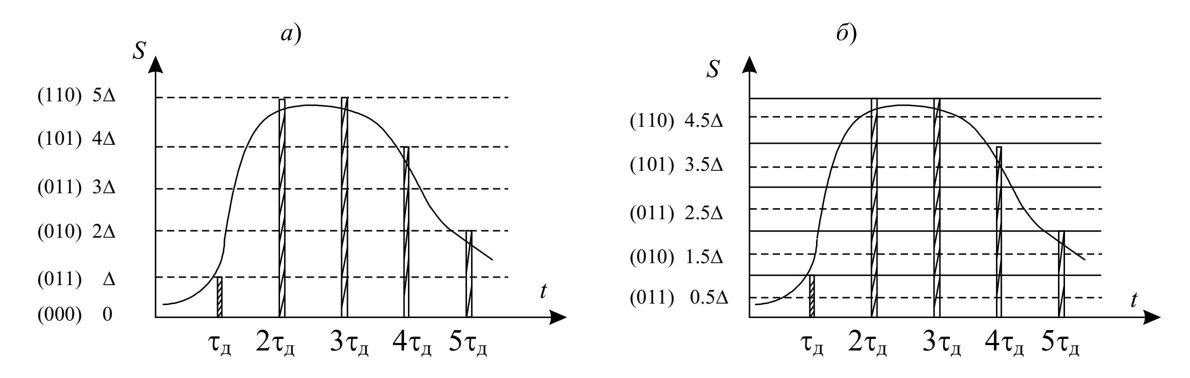


Рис. 4.50 – Дискретизация и квантование аналогового сигнала

На рис. 4.50, *а* рабочая точка характеристики (первый выходной отсчет — 000) совпадает с нулевым значением входного сигнала. Максимальная погрешность квантования равна Δ_0.

На рис. 4.50, *б* первый отсчет 001 принимается при значениях входного сигнала, колеблющихся в диапазоне 0 – Δ вокруг значения 0,5Δ. Аналогично все последующие отсчеты привязаны к точкам 1,5Δ, 2,5Δ и т. д. Максимальная погрешность квантования здесь равна $\pm\Delta/2$.

4.6.1 Шумы дискретизации

Если при дискретизации и передаче расстояния между отсчетами становятся неодинаковыми, то будут появляться шумы дискретизации, т. е. шумы неравномерности временных отсчетов:

$$\tau_д + \Delta\tau_i. \quad (4.5)$$

Величина $\Delta\tau_i$ на каждом шаге есть случайная величина.

Следствием этого будет изменение формы принимаемого сигнала, потому что выходные отсчеты будут смещены во времени по отношению к исходным. Приведенный ниже рис. 4.51 иллюстрирует этот процесс изменения сигнала.

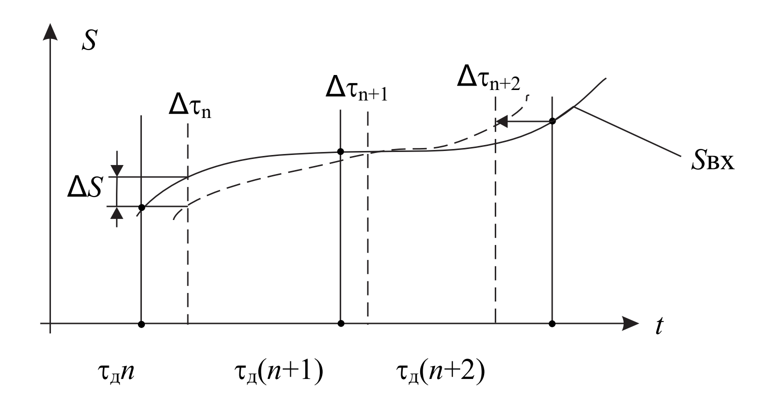


Рис. 4.51 – Изменение формы принимаемого сигнала в связи со случайным отклонением $\Delta\tau_i$

Основные причины нестабильности τ_∂:

1) нестабильность частоты задающего тактового генератора;
2) случайные изменения времени задержки в тракте передачи (линиях связи, регенераторах и т. п.). Это явление называют джиттером, или фазовым дрожанием, или фазовым шумом.

Поскольку эти два источника фазового шума независимы, то два случайных процесса не коррелированы и их влияние можно оценить с помощью энергетических характеристик: дисперсии и мощности шума.

Если отклонение τ_∂ за счет нестабильности тактового генератора обозначить через $\Delta\tau_{rn}$, а за счет фазового дрожания — $\Delta\tau_{\text{ф}n}$, то при условии $\Delta\tau_n \ll \tau_\partial$ мощность шумов дискретизации можно записать через мощность шумов нестабильности генератора $P_{\text{ш г}}$ и мощность шумов фазового дрожания $P_{\text{ш ф}}$:

$$P_{\text{ш}\,\partial} = P_{\text{ш г}} + P_{\text{ш ф}}. \tag{4.6}$$

Поскольку мощность шума случайного процесса есть дисперсия, то для левой части можно записать:

$$P_{\text{ш}\,\partial} = \frac{\overline{\Delta S}^2}{S^2}, \tag{4.7}$$

где $\overline{\Delta S}^2$ — дисперсия отклонения выходного сигнала S от входного.

Для правой части

$$P_{\text{ш г}} + P_{\text{ш ф}} = \frac{\overline{\Delta\tau}^2_{n\,\Gamma}}{\tau_\text{д}^2} + \frac{\overline{\Delta\tau}^2_{n\,\text{ф}}}{\tau_\text{д}^2} = a^2 + b^2. \tag{4.8}$$

Приравнивая (4.7) и (4.8), получим уравнение для расчета шумов дискретизации

$$\overline{\Delta S}^2 = \pi^2 S^2 (a^2 + b^2), \tag{4.9}$$

где множитель π^2 появился при строгом статистическом расчете.

Из (4.9) находится выражение для защищенности от шумов дискретизации

$$A_{\text{ш}\,\partial} \geqslant 10\lg\left[\pi^2(a^2 + b^2)\right]^{-1}. \tag{4.10}$$

Зная a и b, можно найти мощность шумов дискретизации, и наоборот, задаваясь защищенностью $A_{ш\ д}$, можно найти требования к джиттеру и требования к тактовой стабильности генератора.

Так, для основного цифрового канала (V = 64 кбит/с, $\tau_д$ = 125 мкс) можно оценить $\Delta\tau_n \leqslant 810$ нс при $A_{ш\ д}$ в канале = 34 дБ.

4.6.2 Шумы квантования

Природа шумов квантования связана с округлением отсчета сигнала до значения ближайшего уровня (рис. 4.50).

Последовательные ошибки квантования в ИКМ-кодере в общем случае предполагаются распределенными по случайному закону и не коррелированными друг с другом. Таким образом, совокупный эффект ошибок квантования в системах с ИКМ можно рассматривать как аддитивные шумы, имеющие субъективное воздействие, которое аналогично воздействию шума с ограниченной полосой. На рис. 4.52 представлена зависимость ошибок квантования от амплитуды сигнала для кодера с равномерными шагами квантования и с характеристикой, приведенной на рис. 4.50, *б*.

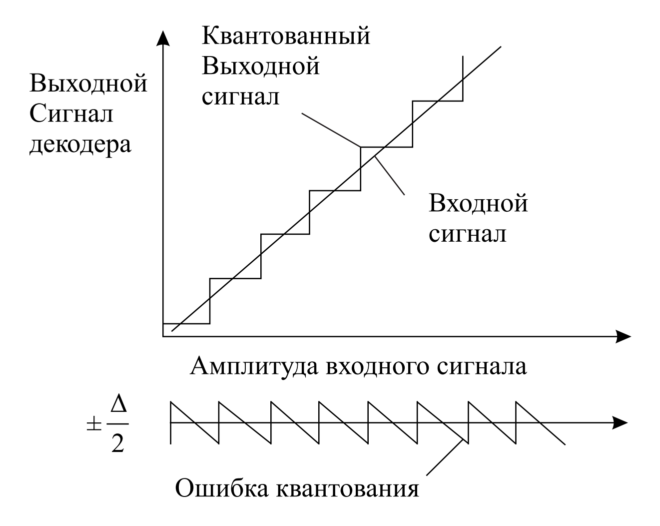


Рис. 4.52 – Зависимость ошибок квантования от амплитуды отсчета

Ошибки, или шум, квантования, возникающие при преобразовании аналогового сигнала в цифровую форму, обычно выражаются в виде средней мощности шума по отношению к средней мощности сигнала.

Для равномерного квантования отношение сигнал-шум определяется формулами (4.3) и (4.4).

При определении среднего значения шума квантования будем руководствоваться следующими положениями:

- ошибка квантования ограничена по амплитуде значением $\Delta/2$, Δ — это шаг квантования (декодированные выходные дискреты располагаются точно посредине шага квантования);
- можно предположить, что значения дискретов с равной вероятностью могут попадать в любую точку в пределах шага квантования (предполагается равномерная плотность вероятности, равная $1/\Delta$;

- предполагается, что амплитуды сигнала ограничены рабочим диапазоном кодера. Если значение дискрета превышает границу наивысшего шага квантования, то возникают искажения, вызванные перегрузкой.

При этом мощность шума квантования:

$$P_{\text{ш. кв.}} = \frac{\Delta^2}{12}. \tag{4.11}$$

При расчете отношений сигнал-шум квантования обычно сопоставляют нефильтрованный сигнал на выходе декодера с нефильтрованными ошибками квантования. На практике фильтр на выходе кодера уменьшает уровень мощности и сигнала, и шума. Мощность шума уменьшается в большей степени, чем мощность сигнала, поскольку дискреты шума имеют более широкий спектр, чем дискреты речи. Вследствие этого отношение сигнал-шум квантования при наличии фильтра обычно выше значений, рассчитываемых по формулам на 1…2 дБ.

Высококачественные ИКМ-кодеры создают шум квантования, который равномерно распределен в диапазоне частот канала тональной частоты и не зависит от кодируемого сигнала. В этом случае отношение сигнал-шум квантования является хорошей мерой качества ИКМ-преобразования.

При неравномерном квантовании расчет шумов квантования следует проводить исходя из того, что шаг квантования в каждом сегменте разный. Кроме того, необходимо учитывать вероятность попадания значения входного сигнала в заданный сегмент.

$$P_{кв} = \sum_i \frac{\Delta^2 i}{12} P(S_{вхi}). \tag{4.12}$$

Вероятности $S_{вхi}$ зависят от типа входного трафика. Так, для телефонных сигналов эта функция описывается выражением (4.13) и представлена на рис. 4.53. Некоторые результаты расчета по этим формулам будут представлены в конце раздела.

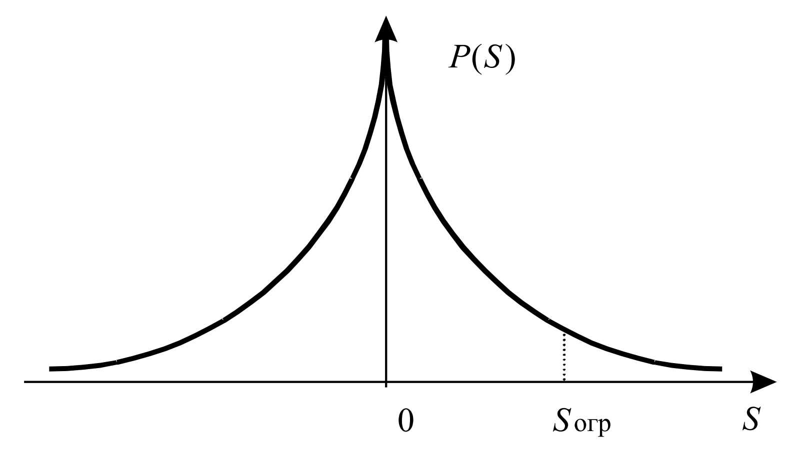


Рис. 4.53 – Плотность распределения $p(S_{\text{ВХ}})$

$$P(S) = \frac{\alpha}{2} \cdot e^{-\alpha \cdot |S|}, \tag{4.13}$$

где $\alpha = \sqrt[3]{2}/S_{\text{д}}$.

4.6.3 Шумы незагруженного канала

Анализ выражения (4.3) показывает, что при заданном Δ отношение сигнал-шум мало для малых значений сигналов. Как показано на рис. 4.54, шумы равны значениям сигнала, если значения его дискретных отсчетов приходятся на первый шаг квантования, а характеристика квантования имеет рабочую точку на границе между шагами квантования.

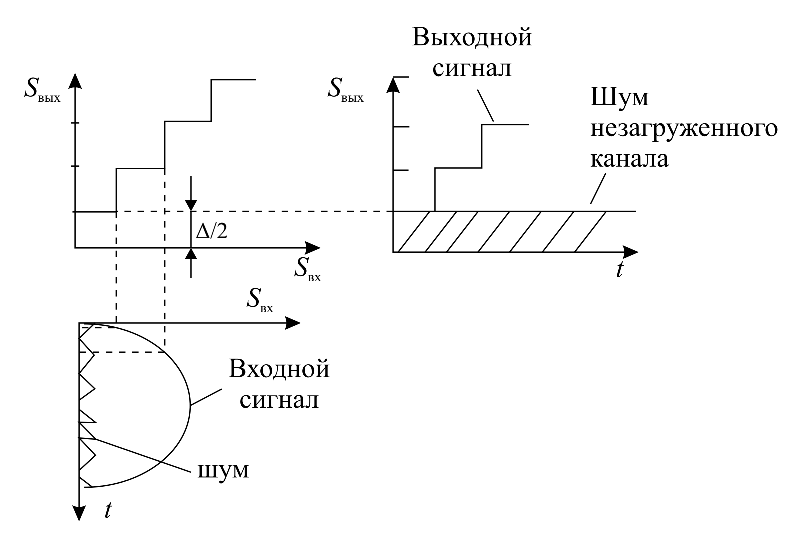


Рис. 4.54 – Шумы незагруженного канала

Этот эффект особенно неприятен во время пауз речи и носит название шумов незагруженного канала. При молчащем абоненте существуют аналоговые шумы, которые не превышают нулевой уровень Δ/2, но создают шумы на выходе. На рис. 4.55 изображен один из методов минимизации шумов незагруженного канала в системах с ИКМ путем сдвига характеристики квантования от начала координат. В этом случае все значения дискретов, приходящиеся на центральный шаг квантования, постоянно декодируются как нулевой сигнал на выходе.

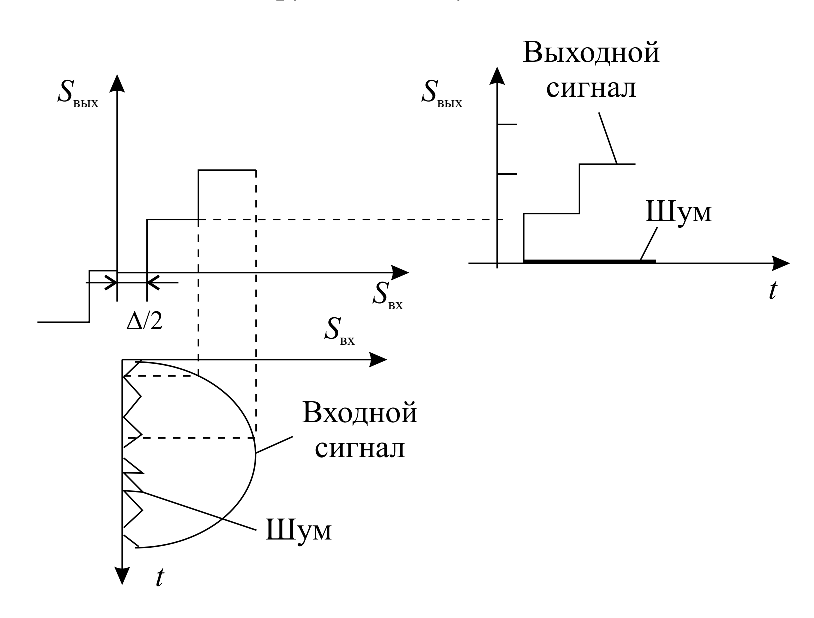


Рис. 4.55 – Подавление шумов незагруженного канала

Первая характеристика квантования не может дать на выходе нулевого сигнала. Вторая характеристика очевидно более предпочтительна, поскольку в этом случае очень малые сигналы образуют на выходе сигнал с нулевым значением. Однако если амплитуда сигнала сопоставима с размером шага квантования или на входе кодера существует смещение постоянного тока, шумы незагруженного канала могут представлять проблему также и при установке рабочей точки кодера посредине шага квантования.

4.6.4 Шумы ограничения

При кодировании обычно искусственно ограничивают уровень выходного сигнала. Характеристика квантователя с ограниченным $S_{вых}$ приведена на рис. 4.56.

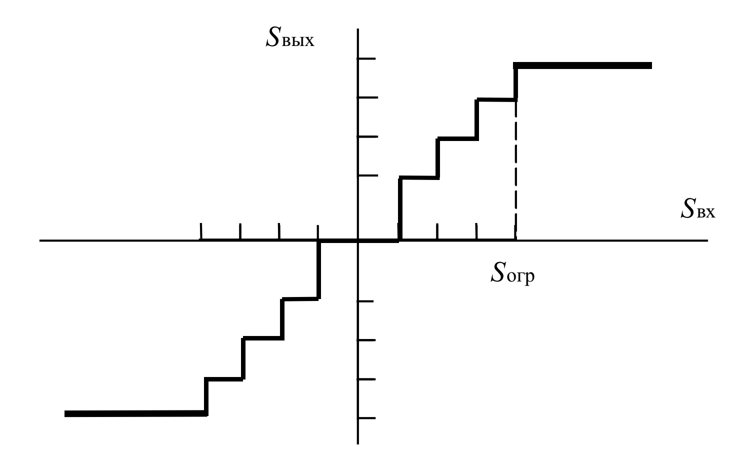


Рис. 4.56 – Характеристика квантователя с ограниченным $S_{ВЫХ}$

Если $S_{ВХ} > S_{ОГР}$, то значение сигнала на выходе будет $S_{ОГР}$. Возникающие искажения будут расцениваться как воздействие помехи. Вероятность такого события мала, но не учитывать ее нельзя. Для расчета мощности помехи воспользуемся методикой вычисления мощности случайного процесса.

$$P_{ОГР} = 2 \cdot \int\limits_{S_{ОГР}}^{\infty} (S_{ОГР} - S_{ВХ})^2 \cdot P(S_{ВХ})\, dS_{ВХ}. \tag{4.14}$$

На рис. 4.57 приведены результаты расчета защищенности $A_з$ от шумов квантования и шумов ограничения как функции уровня действующего значения входного сигнала $U_д$ к его максимальному значению $U_м$. Закон компрессии A, число сегментов — 8, а число шагов в каждом сегменте — 16. Функция 1 соответствует речевому сигналу, а 2 — тестовому синусоидальному с частотой 1000 Гц.

Как видно, обеспечивается постоянное отношение сигнал-шум $A_з$ порядка 38 дБ в большом динамическом диапазоне изменения входных сигналов. При приближении действующего значения к максимальному начинают проявляться шумы ограничения.

Шумы ограничения можно регулировать выбором $S_{огр}$. Кроме того, эти шумы автоматически снижаются вследствие психологического фактора. При повышении громкости речи дополнительно возникшие шумы заставляют абонентов говорить тише.

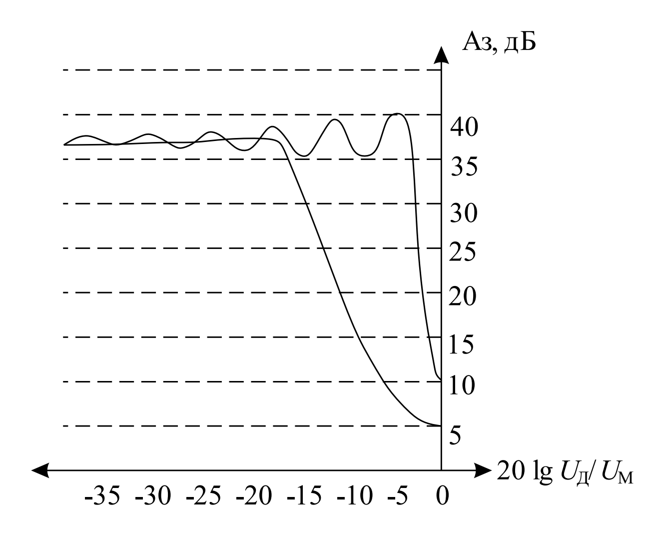
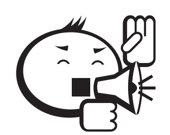


Рис. 4.57 – Зависимость защищенности от отношения $U_Д/U_М$

4.7 Объединение цифровых потоков

Первичные цифровые потоки (ИКМ-30) могут объединяться для увеличения скорости передачи информации по одному групповому тракту [1, 4]. При этом за одно и то же время, например длительность цикла, нужно передать число канальных интервалов в несколько (n) раз большее, чем в первичном потоке. Это означает, что длительность передаваемых импульсов в n раз должна быть короче.



Объединение осуществляется следующим образом (рис. 4.58). Входные цифровые последовательности поступают параллельно на входы запоминающих устройств, где часть их записывается. После окончания записи осуществляется поочередное считывание в общую нагрузку за более короткое время.

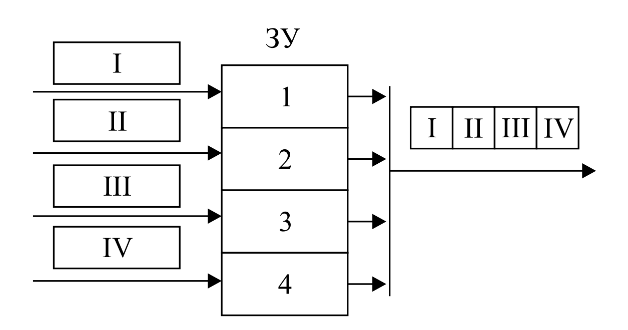


Рис. 4.58 – Объединение цифровых потоков

В ЗУ может записываться один символ (побитовая запись) или группа символов. Чаще всего во втором случае записываются байты (побайтная запись). При объединении и разделении цифровых потоков различают три случая:

1) синфазно-синхронное объединение;

2) синхронное объединение;
3) асинхронное объединение.

При синфазно-синхронном объединении (рис. 4.59) равны скорости объединяемых потоков (один и тот же тактовый генератор), и все они поступают без задержки в один и тот же момент времени (с одинаковой фазой).

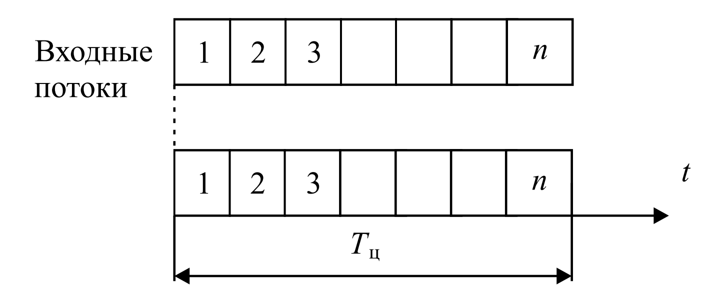


Рис. 4.59 – Синфазно-синхронное объединение

При синхронном объединении (рис. 4.60) скорости входных потоков по-прежнему равны, но моменты их прихода на ЗУ разные вследствие задержки в каналах связи. В этом случае в каждом канале для синхронизации вводятся несколько служебных байтов (A, B). Помимо функции синхронизации эти байты могут нести и другую служебную информацию. Так как эти байты должны быть переданы вместе с информацией за неизменное время $T_ц$, то скорость считывания будет больше, чем при синфазно-синхронном объединении. Например, если на каждые 32 байта входной последовательности добавляется один служебный, увеличение скорости будет равно 33/32.

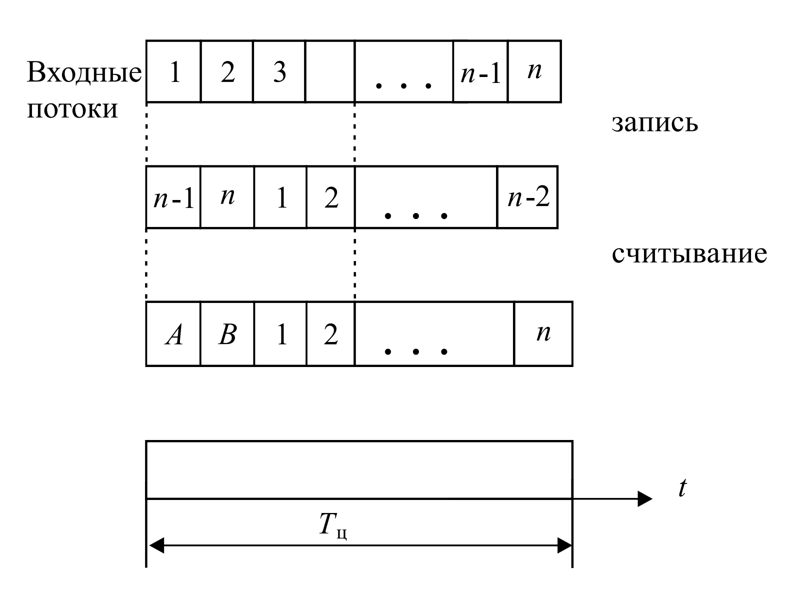
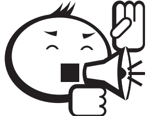


Рис. 4.60 – Синхронное объединение



В случае асинхронного объединения, помимо фазовой задержки, входные потоки могут иметь еще и разные скорости. Обычно это характерно для плезиохронных систем передачи, когда генераторное оборудование на передающей стороне имеет свои автономные генераторы тактовой частоты. Частоты этих генераторов не могут совпадать абсолютно точно, т. е. содержат разброс по тактовой частоте $\Delta f_т$. Кроме того, любому генератору присуща нестабильность частоты, что увеличивает разброс и делает его случайным. Поэтому разница между скоростью при записи V_3 и скоростью при считывании V_c может быть как положительной, так и отрицательной. И в том и в другом случае скорость записи и считывания надо согласовывать. Изменить тактовую частоту генератора считывания мы не можем, потому что он один для всех входных потоков. Следовательно, нужно изменять скорость каждого из них при записи (рис. 4.61).

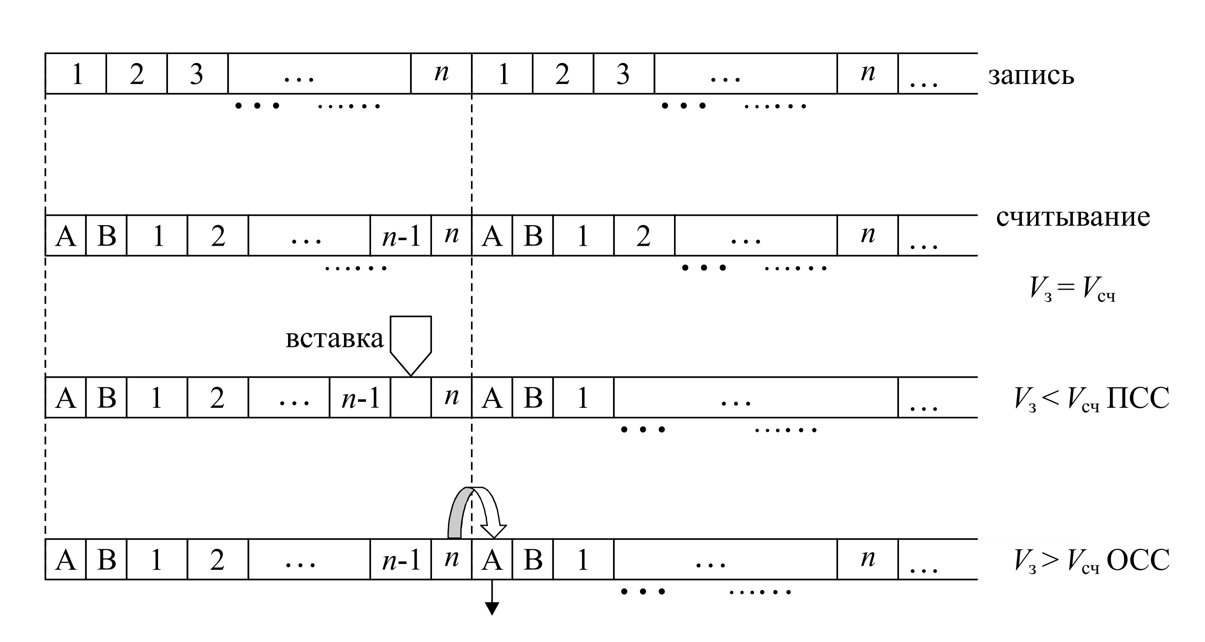


Рис. 4.61 – Асинхронное объединение каналов

Если $V_з = V_c$, никакого согласования не нужно. При $V_з < V_c$ имеем дело с положительным согласованием скоростей (ПСС). В этом случае процесс считывания заканчивается раньше положенного времени и образуется временная пауза, которая увеличивается со временем. В определенный момент эта пауза становится равной длительности импульса посылки и следящее устройство ЦСП вырабатывает команду на ПСС. По этой команде в конце цикла процесс считывания задерживается на одну позицию так, как будто между двумя информационными импульсами ($n - 1$ и n) вставим «пустой». Эту процедуру называют торможением, или «стаффингом», от слова «вставка» — стаффинг.

При $V_з > V_c$ (отрицательное согласование скоростей — ОСС) для *n*-го импульса не хватает позиции. По команде согласования скоростей (КСС) последний *n* импульс передается вместо одного из служебных в следующем.

Управление согласованием скоростей осуществляется посредством КСС, которые вырабатываются в самом устройстве объединения (мультиплексоре), по мере того как задержка или опережение достигают критического значения. В оборудование разделения потоков КСС поступают в байтах служебной информации на определенных позициях. Обычно используют систему двустороннего (положительного и отрицательного) согласования скоростей, хотя она и сложней односторонней. В двусторонней системе необходимость подачи КСС возникает гораздо реже, а следовательно, и меньше вероятность ошибки согласования. Поскольку ошибка в согласовании скоростей приводит к потере синхронности передачи, а следовательно, к разрыву связи, при передаче КСС принимают специальные меры: для повышения помехозащищенности команд каждый бит информации КСС передается три раза, а также применяется специальный алгоритм обработки принятых команд, позволяющий исключать ошибки согласования, даже если отдельные КСС будут опознаны неверно.

4.8 Плезиохронная цифровая иерархия

Описанные выше принципы организации первичных цифровых потоков (ИКМ-30) и их объединение позволили предложить плезиохронную цифровую иерархию ЦСП (рис. 4.62).

Здесь на каждой ступени объединения группируются четыре цифровых потока и к ним добавляются служебные символы, в которых помещаются сигналы синхронизации объединенного потока, команды согласования скоростей каждого из объединяемых потоков и информация, которая исключается из потока при отрицательном согласовании скоростей.

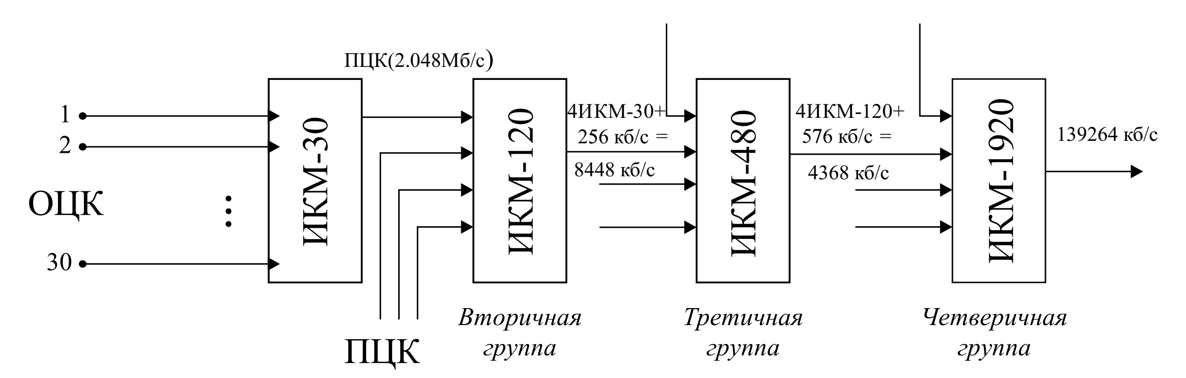


Рис. 4.62 – Плезиохронная цифровая иерархия

Рассмотрим временной план вторичной группы (рис. 4.63).

Временной спектр (цикл передачи) вторичной ЦСП с ИКМ (ИКМ-120) является типичным для всех ЦСП с ИКМ высших ступеней плезиохронной иерархии. Цикл передачи имеет длительность 125 мкс и состоит из 1056 позиций. Цикл разделен на четыре субцикла, одинаковых по длительности. Первые восемь позиций первого субцикла заняты комбинацией 111001100, представляющей собой цикловой

синхросигнал объединенного потока. Остальные 256 позиций первого субцикла (с 9-ой по 264-ю включительно) заняты информацией посимвольно объединенных исходных потоков, номера которых отмечены на рисунке под номерами позиций. Первые четыре позиции второго субцикла заняты первыми символами КСС объединяемых потоков, а следующие четыре — сигналами служебной связи. Вторые и третьи символы КСС (команда согласования скоростей) имеют вид 111, а отрицательного — 000 занимают первые четыре позиции субциклов III и IV. Позиции 5–8 субцикла III используются для передачи сигналов дискретной информации (две позиции), аварийных сигналов (одна позиция) и вызова по каналу служебной связи (одна позиция). Наконец, в субцикле IV на позициях 5–8 передается информация объединяемых потоков при отрицательном согласовании скоростей. При положительном согласовании исключаются позиции 9–12 субцикла IV. Поскольку операция согласования скоростей осуществляется не чаще, чем через 78 циклов, позиции 6–8 субцикла IV, предназначенные для передачи информации при отрицательном согласовании, большую часть времени свободны и используются для передачи информации о промежуточных значениях и характере изменения паузы. Таким образом, из общего числа позиций, равного 1056, информационными являются 1024 ± 4 позиции.

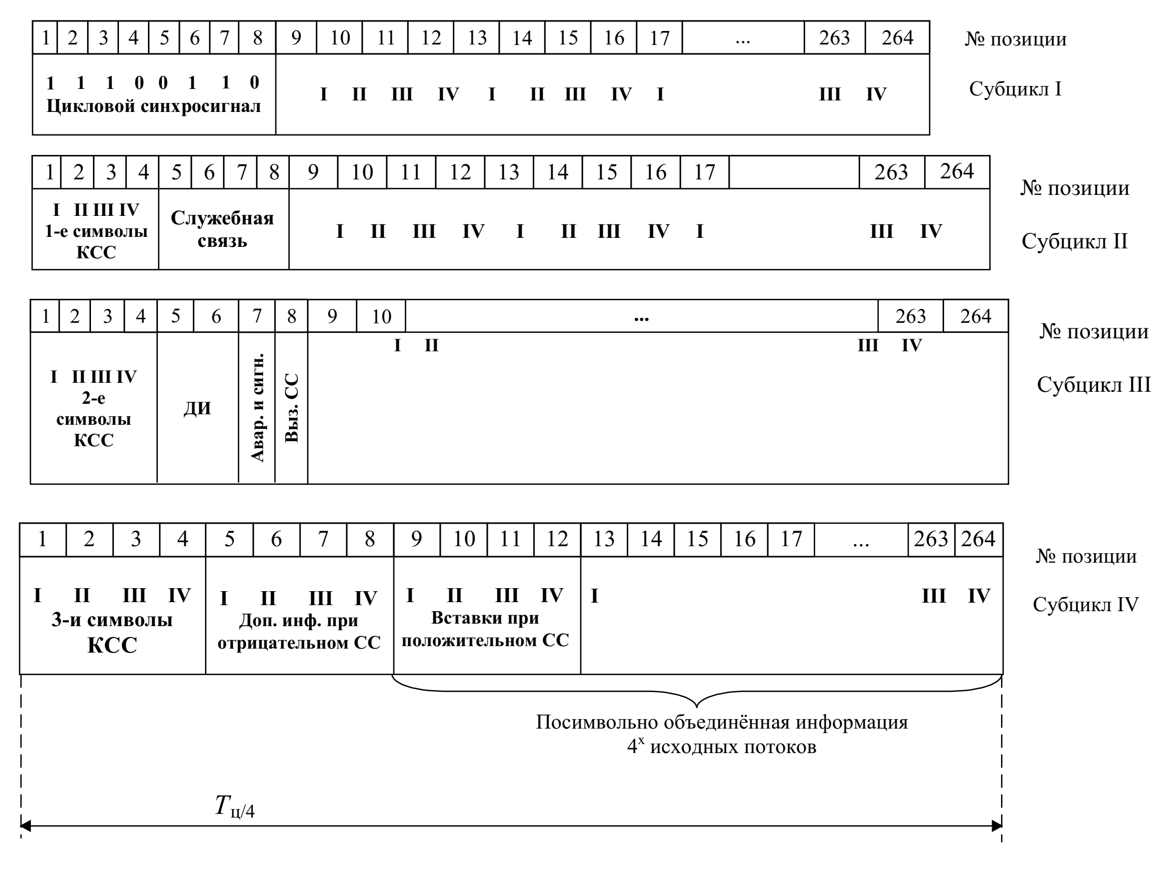


Рис. 4.63 – Временной спектр ЦСП ИКМ-120

Разделение цикла передачи на несколько субциклов имеет следующие преимущества. Во-первых, это позволяет разнести во времени символы КСС, что повышает защищенность этих команд от импульсных помех, поскольку импульсные помехи обычно группируются в пакеты, воздействующие на несколько следующих

друг за другом импульсов. Во-вторых, поскольку при приеме служебной информации прекращается считывание информации из ЗУ, выделяемый информационный поток обладает неравномерностью, которая должна сглаживаться системой ФАПЧ. Работа ФАПЧ сопровождается фазовыми флуктуациями импульсов выделенного потока, которые снижаются, если снижается неравномерность, а она тем меньше, чем больше субциклов содержится в цикле передачи. Наконец, в-третьих, задержка считывания информации объединяемых потоков из ЗУ как на передаче, так и на приеме на время прохождения служебной информации заставляет увеличивать емкость памяти ЗУ. Очевидно, что это увеличение тем меньше, чем больше субциклов содержится в цикле, и составляет для рассматриваемого случая две ячейки плюс еще одна на время проверки КСС на отсутствие ошибок. Общее число ячеек ЗУ существующих ЦСП составляет от пяти до восьми и должно быть увеличено по крайней мере втрое при отсутствии деления цикла передачи на субциклы.

4.9 Синхронная цифровая иерархия (SDH)

Новая цифровая иерархия была задумана как скоростная информационная среда передачи для транспортирования цифровых потоков с разными скоростями [8, 11]. В этой иерархии объединяются и разъединяются потоки со скоростями 155,520 Мбит/с и выше. Поскольку способ объединения был выбран синхронный, то данная иерархия получила название синхронной цифровой иерархии (Synchronous Digital Hierarchy – SDH).

Перечислим следующие предпосылки создания SDH:

1. Активное внедрение цифровых систем передачи.
2. Недостатки системы плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ = PDH), а именно:
   а) сложность объединения и разделения цифровых потоков; необходимо согласование скоростей, т. к. у каждого потока различные тактовая частота $f_т$ и скорость;
   б) при выделении первичного потока ИКМ-30 нужно последовательно демультиплексировать группы ИКМ-120, ИКМ-480 и т. д., выделить, что нужно, а потом снова провести объединение;
   в) средства ПЦИ разных изготовителей зачастую не стыкуются друг с другом;
   г) наличие разных европейской и американской систем ПЦИ.
3. Внедрение линий связи с большой пропускной способностью (ВОЛС, ЦРРЛ).

Основные принципы СЦИ:

1. Временное разделение каналов (ВРК).
2. СЦИ работает с гораздо большими скоростями передачи информации: 155,52 Мбит/с, 622,08 Мбит/с и т. д.
3. Синхронная цифровая иерархия включает в себя все предыдущие транспортные протоколы – это PDH, ISDN, ATM.
4. Контейнерный способ упаковки данных.

Для передачи цифрового потока создается синхронный транспортный модуль (Synchronous Transport Module) STM-1 (табл. 4.5). Чтобы создать более мощные цифровые потоки, в SDH-системах формируется следующая цифровая иерархия: четыре модуля STM-1 объединяются путем побайтового мультиплексирования в модуль STM-4, передаваемый со скоростью 622,080 Мбит/с; затем четыре модуля STM-4 объединяются в модуль STM-16 со скоростью передачи 2488,320 Мбит/с; четыре модуля STM-16 могут быть объединены в высокоскоростной модуль STM-64 (9953,280 Мбит/с).

Таблица 4.5 – Состав СТМ-1

Уровень	Контейнер	Сигналы ПЦИ, Мбит/с		
1	С1–1 С1–2	1,5 2 (ИКМ-30)	T1 E1	Американский стандарт Европейский стандарт
2	С2	6	T2	Американский стандарт
3	С3	34 (ИКМ-480) 45 (США)	E3 T3	Европейский стандарт Американский стандарт
4	С4	140	E4	Европейский стандарт

На рис. 4.64 показана структура модуля STM.

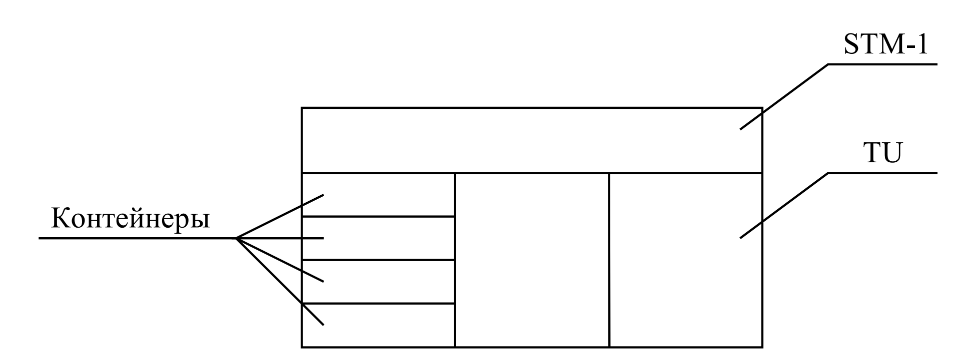


Рис. 4.64 – Синхронный транспортный модуль

Он разбивается на субблоки (TU-Tributary Unit). А те в свою очередь разбиваются на контейнеры по 2 Мбит/с, 34 Мбит/с, 144 Мбит/с.

При передаче у каждого STM, TU и контейнера существует своей номер, называемый заголовком.

Как размещается информация в этих контейнерах? Контейнеры вкладываются в STM. STM перемещается во времени независимо от объема поступаемой информации и времени ее поступления. Поэтому контейнеры помещаются в тело (объем) модуля случайно, асинхронно. Чтобы идентифицировать положение контейнера в вагоне, вводят указатель (Pointer). Поскольку при такой схеме заполнения STM его использование нерационально, в дальнейшем производится переупаковка. При этом указатели контейнеров и блоков меняются в соответствии с новым положением.

Этапы формирования STM-1:

1. Поступающий цифровой сигнал упаковывают в контейнер **C**.
2. Добавлением маршрутного или трактового заголовка (Path Over Head — POH) контейнер преобразуется в виртуальный контейнер **VC**

$$VC = C + POH.$$

   Виртуальный контейнер формируется и расформировывается в точках окончания и начала тракта. Заголовок POH, кроме адреса, позволяет осуществить контроль качества передачи по тракту, передачу аварийной и эксплуатационной информации.
3. Виртуальный контейнер снабжают указателем PTR и образуют тем самым транспортный блок TU (Tributary Unit)

$$TU = VC + PTR_{TU},$$

   где PTR — указатель начала VC внутри субблока. PTR осуществляет дополнительно выравнивание скоростей.
4. Затем несколько транспортных блоков путем мультиплексирования объединяют в группу транспортных блоков TUG (Tributary Unit Group).
5. Затем TUG путем мультиплексирования преобразовывается в виртуальный контейнер **VC-4**.
6. VC-4 снабжают секционным заголовком SOH, образуя таким способом административный блок AU-4.
7. Последний помещают непосредственно в модуль STM-1 вместе с секционным заголовком SOH (Section Over Head)

$$STM\text{-}1 = AUG + SOH,$$

   где SOH — секционный заголовок SOH = RSOH + MSOH; RSOH — заголовок регенераторной секции; MSOH — заголовок мультиплексорной секции.

   Примечание: если мы имеем цифровой поток со скоростью 139,264 Мбит/с, образуемый на выходе аппаратуры плезиохронной цифровой иерархии ИКМ-1920, то его сначала упаковывают в контейнер C-4, а затем добавлением маршрутного или транспортного заголовка POH преобразуют сразу в виртуальный контейнер VC-4. То есть в этом случае пропускается создание транспортных блоков и групп.
8. Образование синхронных транспортных модулей высшего порядка

$$STM\text{-}N = \sum STM\text{-}i + (RSOH + MSOH)_i + AUPTR_i,$$

   где $AUPTR_i$ — указатель положения STM внутри потока.

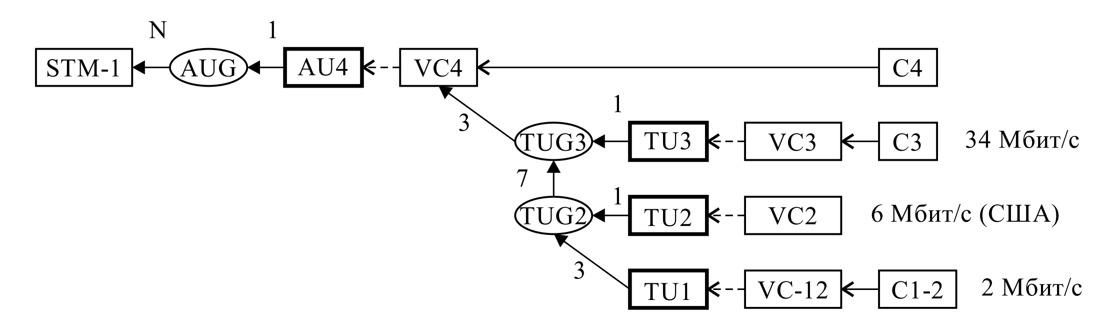


Рис. 4.65 – Упрощенная схема преобразования в SDH (для европейской иерархии):

VC — виртуальный контейнер; TUG — группа субблоков; AU — административный блок; AUG — административная группа; ▭ — размещение указателей; ◄—— — мультиплексирование; ←—— — размещение цифровых потоков в виртуальных контейнеров; ←---- — выравнивание: плавающий режим, формирование нагрузки, выравнивание скоростей

Рассмотрим структуру тракта (рис. 4.66).

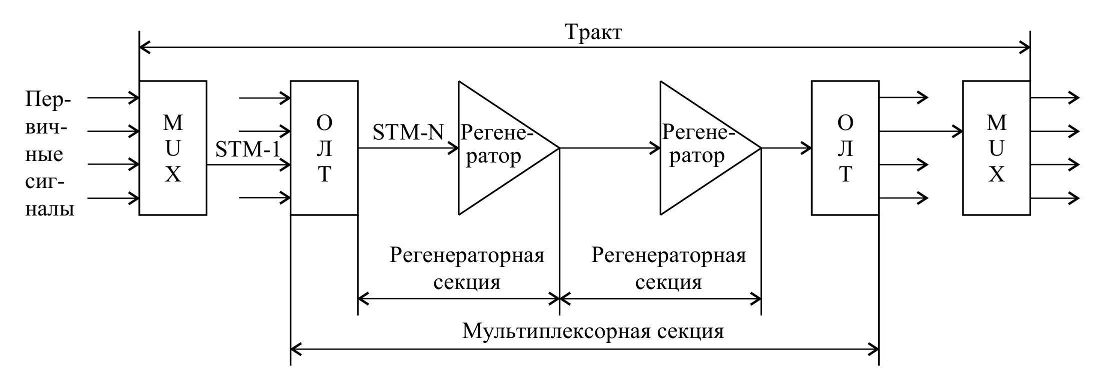


Рис. 4.66 – Структура тракта:
ОЛТ — оборудование линейного тракта; MUX — мультиплексор

Из рис. 4.66 можно определить некоторые функции заголовков RSOH и MSOH. Заголовок RSOH, помимо основной функции идентификации STM_N, должен обеспечивать цикловую синхронизацию, служебную связь, аварийную сигнализацию, контроль и исправление ошибок в соответствующей регенераторной секции.

Заголовок MSOH также обеспечивает функции контроля ошибок, технического обслуживания и управления мультиплексором, но уже в пределах всего тракта.

Рассмотрим структуру кадра модуля STM-1 (рис. 4.67).

Здесь все размеры приведены в байтах, поскольку в системе SDH используется побайтная организация. Всего в модуле STM-1 содержится 19440 бит (125 мкс × × 155,52 Мбит/с) или 2430 байт. Для удобства отображения эти байты расположены в виде прямоугольной таблицы, в которой 9 строк. Каждая строка содержит 270 байт. Поле этой таблицы разделено на две части: информационную и служебную — заголовок. Под заголовок отведены первые 9 байт каждой строки (всего 81 байт).

Первые 9 байт первой строки содержат сигнал кадровой синхронизации FAS (Frame Alignment Signal), остальные 261 байт — информационные (полезная нагрузка). Первые 9 байт второй и третьей строки представляют заголовок регенераторной

секции RSOH, но во времени этот заголовок разделен. Между его первой и второй частями размещен 261 байт полезной нагрузки.



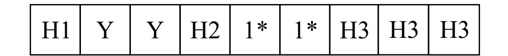
Рис. 4.67 – Структура кадра STM-1

Четвертая строка начинается с указателя PTR, а остальные 5 строк заголовка (45 байт) отведены под заголовок мультиплексорной секции MSOH. Указатель используется для обозначения начала полезной нагрузки кадра. Как видно из рис. 4.67, она начинается не с первой строки кадра после сигнала FAS, а обязательно после указателя и с того места, которое он указывает. Поэтому нумерация емкости нагрузки начинается с десятого байта четвертой строки. Допустимые значения указателя в десятичной системе O-782, что позволяет полезной нагрузке смещаться («плавать») в кадре. Эти смещения обусловлены случайными факторами (рассинхронизация, помехи и т. д.).

«Плавающий» режим нагрузки внутри контейнера позволяет сочетать эти нестабильности во времени с синхронностью работы всей системы в целом, позволяет выделять и вставлять любые отдельные контейнеры.

Размещение указателя начала нагрузки в средней части STM-1 не случайно. В этом случае для выполнения каких-то действий о перераспределении нагрузки (ввод или вывод компонентных сигналов и т. п.) есть время от момента окончания FAS до начала нагрузки. Если бы нагрузка начиналась с первой строки STM-1, информацию пришлось бы записывать в буфер и потом выполнять все операции ввода-вывода.

Плавающий режим нагрузки позволяет решить вопросы согласования скоростей, не нарушая синхронного режима работы. Несмотря на высокую стабильность тактовых генераторов, принимаемый сигнал не полностью синхронизирован с местным генератором. Поэтому и в SDH необходимо как отрицательное согласование скоростей (ОСС), так и положительное (ПСС). При ОСС, как и в PDH, применяется понятие стаффинга. Для выравнивания используются 10–12 байты четвертой строки. При ОСС, когда частота принимаемого сигнала меньше частоты местного генератора и часть байтов не помещается в кадр, для их размещения используется поле указателя (7–9 байты четвертой строки).



H1	Y	Y	H2	1*	1*	H3	H3	H3

Рис. 4.68 – Структура PTR кадра STM-1

Структура указателя приведена на рис. 4.68. Здесь значение указателя содержат байты H1 и H2, причем для него отводится 10 бит (рис. 4.68). Это биты 7, 8 H1 и 1–8 H2. Такое количество бит позволяет иметь максимальное значение указателя в десятичной системе 1023, однако допустимые значения указателя лежат в диапазоне 0–782. Содержание указателя разбито на две группы: нечетные I и четные D. Это сделано для обеспечения его помехоустойчивости. Чаще всего приращение указателя происходит на ±1. Поэтому при увеличении значения указателя инвертируются все нечетные биты (0 → 1, 1 → 0), а при уменьшении инвертируются все четные биты. Достаточно зафиксировать инверсию хотя бы трех бит относительно предыдущего кадра, чтобы сделать вывод об изменении значения указателя.

В указателе биты, обозначенные как N, объявляют об изменении значения указателя. В нормальном состоянии NNNN=0110, при изменении данных указателя NNNN=1001. Биты SS определяют тип полезной нагрузки (контейнера) AU-3 или AU-4.

Наконец байты H3 в указателе составляют тот резерв, который нужен для отрицательного согласования скоростей. Байты Y и 1* не несут какой-то информации и по сути являются резервными.

Рассмотрим теперь подробнее структуру заголовков RSOH и MSOH (рис. 4.69).

RSOH	A1	A1	A1	A2	A2	A2	C1		
	B1			E1			F1		
	D1			D2			D3		
	Указатель AU-4								
MSOH	B2	B2	B2	K1			K2		
	D4			D5			D6		
	D7			D8			D9		
	D10			D11			D12		
	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	E2		

Рис. 4.69 – Структура заголовка STM-1

Здесь байты A1 и A2, как уже говорилось, предназначены для кадровой синхронизации (FES) A1=11110110; A2=00101000. C1 – идентификатор STM, показывает номер, присвоенный STM-1. Это необходимо, чтобы идентифицировать различные модули STM-1 в модулях более высокого порядка STM-4.

Байт B1 предназначен для контроля ошибок при прохождении сигнала через регенератор. Для этого он подвергается кодированию по алгоритму BIP-8. Суть этого метода заключается в суммировании по модулю 2 всех одноименных битов каждого передаваемого байта в начале на передающем конце. Полученные значения сумм передаются одним байтом, который потом сравнивается побитно с аналогичным

байтом, полученным на приемном конце. Ниже приведен пример действия такого алгоритма.

Байты	Передатчик		Приемник
1	01010110		01010110
2	10110110		11111111
3	10101010		10101010
4		Помеха→	....
2429	11001101		11001101
2430	01100110		01100110
BIP-8	11100001		10101000 ошибки

При помощи BIP-8 можно обнаружить 8 ошибок (по одной в каждом бите) в контейнере. Двойные ошибки не обнаруживаются.

Байты E1 и F1 служат для организации служебной связи и дополнительной передачи данных соответственно. Байты D1–D3 формируют встроенный канал управления (TMN).

Последние пять строк заголовка служат для взаимодействия с мультиплексорами. Байты B2, E2, D4-D12 определяют те же функции, что и аналогичные байты в RSOH. Байты K1 и K2 организуют канал автоматического переключения на резерв при авариях, а также служат для передачи сообщения об этих авариях. Байты Z1, Z2, X предназначены для национального применения, а байты, не отмеченные никак, — для международного применения в будущем.

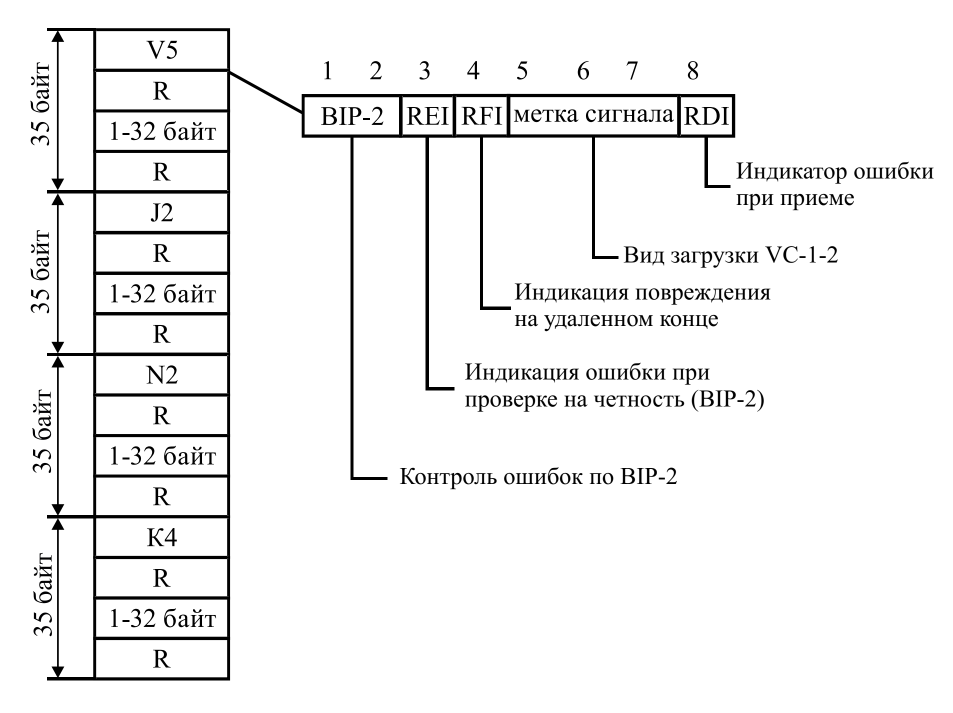


Рис. 4.70 – Структура VC1-2

Рассмотрим теперь мультиплексирование контейнеров низшего порядка в STM-1 на примере контейнеров C1–2. Схематично процесс мультиплексирования показан на рис. 4.65. Здесь приведем более детальное рассмотрение. Структура виртуального контейнера VC1–2 и его заголовки даны на рис. 4.70. Здесь заголовок POH представлен байтами V3, J2, N2 и K4 в четырех кадрах, составляющих мультикадр.

Назначение битов заголовка следует из рисунка. Поле «Вид загрузки» означает следующее. При формировании нагрузки VC1–2 допускается три варианта:

- бит-синхронный режим, когда сигнал не имеет побайтной структуры. Этот режим задается кодом 011, но он практически не используется;
- байт-синхронный режим. В этом случае начало сигнала строго совпадает с началом контейнера. Другими словами, при этом режиме указатель (PTR) не нужен. Этот режим идентифицируется — 100. На практике применяется не так часто;
- асинхронный режим (010) допускает смещения нагрузки и, соответственно, требует применения указателей. Этот режим размещения нагрузки наиболее распространен, поэтому рассмотрим его подробней.

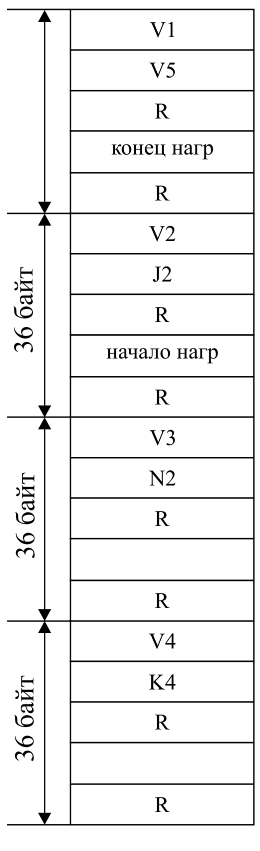
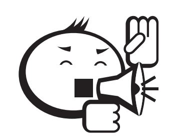


Рис. 4.71 – Мультикадр

Байт J2 служит, так же как и J0, для идентификации контейнера и его маршрута. Как и байт N2, V5 выполняет функции мониторинга канала связи, а байт K4 определяет возможность автоматического резервирования.

Функции указателя при формировании VC1–2 те же самые, что и для AU-4, а именно поддержание плавающего режима нагрузки и выравнивание скоростей. Для этих целей одного дополнительного байта недостаточно, поэтому формируется мультикадр, состоящий из четырех кадров (рис. 4.71). Байты V1, V2 указывают начало нагрузки, которая начинается не в первом, а во втором кадре (POH идет после V2). Структура и назначение байтов V1 и V2 такая же, как у H1 и H2 (рис. 4.72). Байт V3 и следующий за ним байт R используются для выравнивания скоростей. При положительном согласовании информационные байты сдвигаются от V3 к V4. При отрицательном согласовании они сдвигаются в противоположном направлении и в поле указателя V3 могут занять несколько бит.



Отличия SDH от PDH:

1. Единый для всех высокостабильный тактовый генератор.
2. Большое количество служебной информации, т. е. заголовков и указателей.
3. Универсальный интерфейс (имеется в виду взаимодействие) для всех национальных систем: США, Япония, Европа.

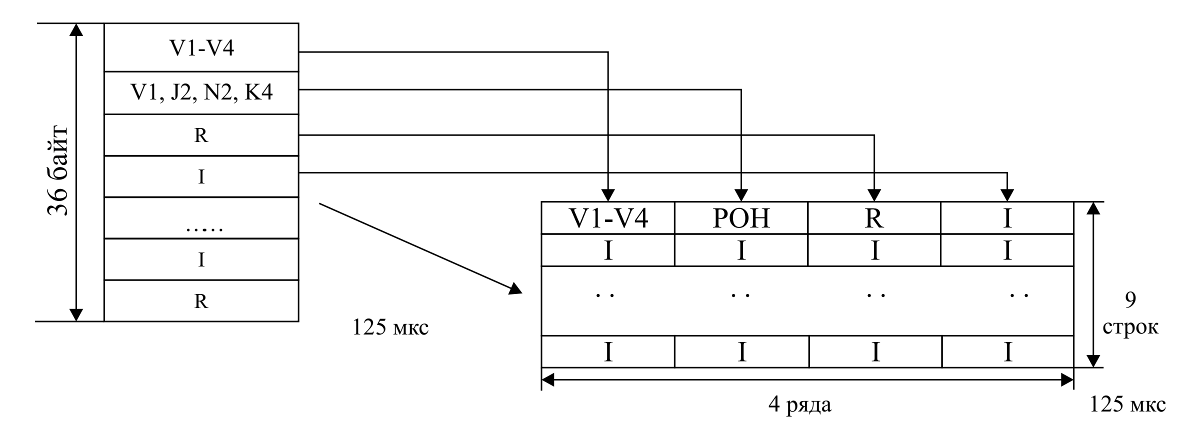


Рис. 4.72 – Размеры и формат TU-12

Процесс мультиплексирования подробно изображен на рис. 4.73.

Достоинства СЦИ:

1. Упрощенный процесс мультиплексирования и демультиплексирования. Здесь не надо распаковывать весь модуль, как в ПЦИ (см. Предпосылки создания SDH, пункт 2б), так как есть сквозная синхронизация и много заголовков разных уровней, контейнеров и субблоков.
2. Простота ввода компонентных сигналов — заголовки + плавающий режим.
3. Качественное управление сложными сетями:
   - управление конфигурацией сетей (на уровне мультиплексоров);
   - управление неисправностями: дистанционное выявление неисправности и ее исправление;
   - управление качеством (выявление и ликвидация ошибок);
   - управление безопасностью — регистрация несанкционированного доступа и т. п.

Недостатки SDH:

1. Система достаточно дорогая.
2. Необходима высочайшая стабильность тактовой частоты.
3. Большое время вхождения в синхронизм.
4. Система чрезвычайно избыточна, т. к. групповой сигнал содержит много заголовков и свободных мест для дальнейшего использования. Но это окупается высокой пропускной способностью.

Рассмотрим конфигурацию транспортной сети SDH (рис. 4.74).

На рис. 4.75 и 4.76 сеть управления телекоммуникациями (TMN) удаленно из узла управления задает конфигурацию сети (определяет, какие компоненты куда выделить или перенаправить).

Функция мультиплексоров заключается в вводе и выводе различных потоков (E1, E3, E4, STM_i) в синхронные транспортные модули высшего порядка, а также в резервировании в сети. Число входных (выходных) потоков E1 изменяется от 63 до 272 (рис. 4.75).

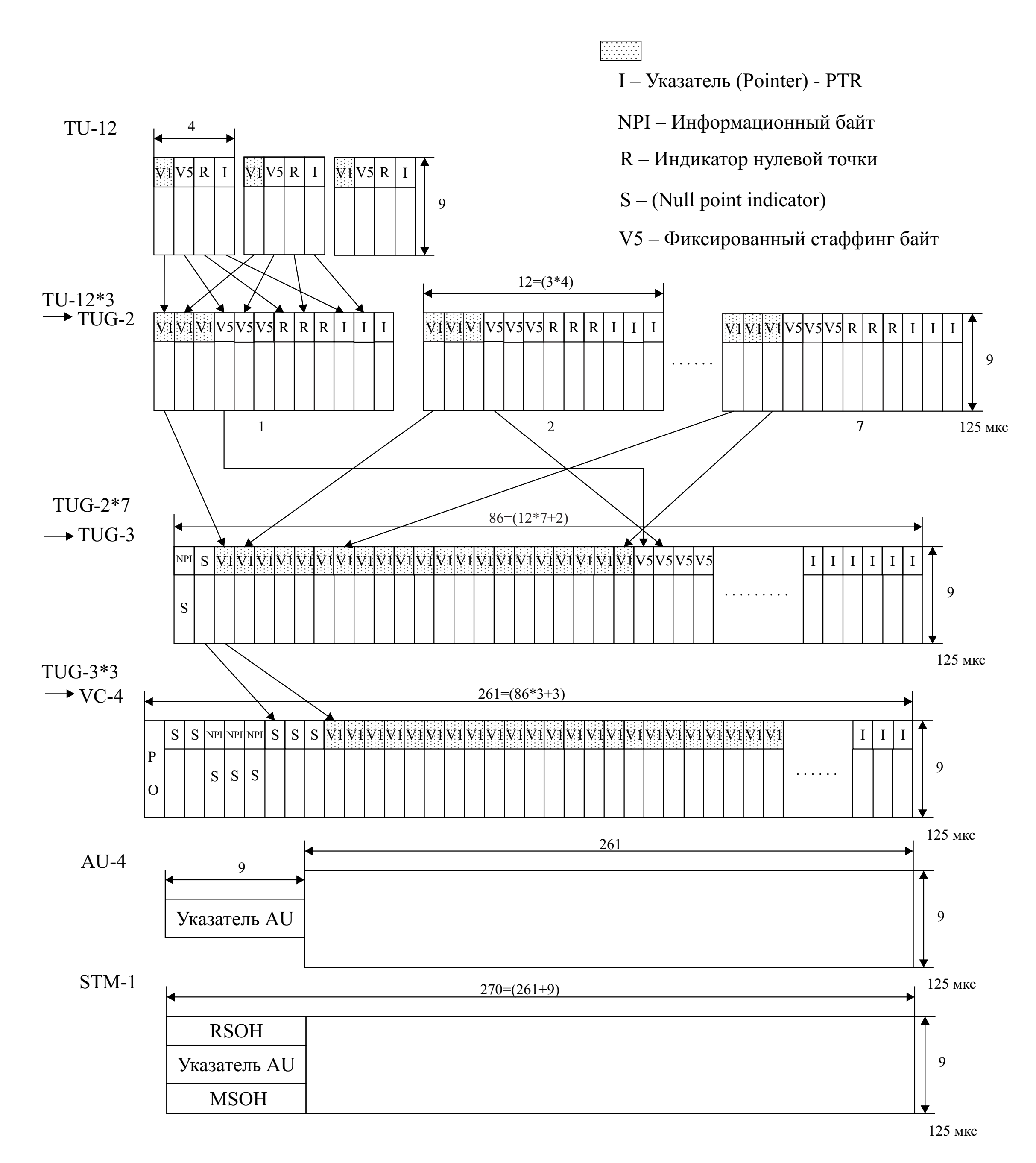


Рис. 4.73 – Мультиплексирование TU-12 в TUG-3

Кросс-коннекторы переключают потоки иерархий PDH и SDH и используются для оперативной реконфигурации сети и управления ее ресурсами. В настоящее время в сетевых элементах функции мультиплексирования и коммутации совмещают. Более того, для цифровых потоков высокого уровня STM-64, STM-256, WDM, DWDM эти процедуры реализуются непосредственно с помощью оптических сигналов, без преобразования их в электрические (рис. 4.76).

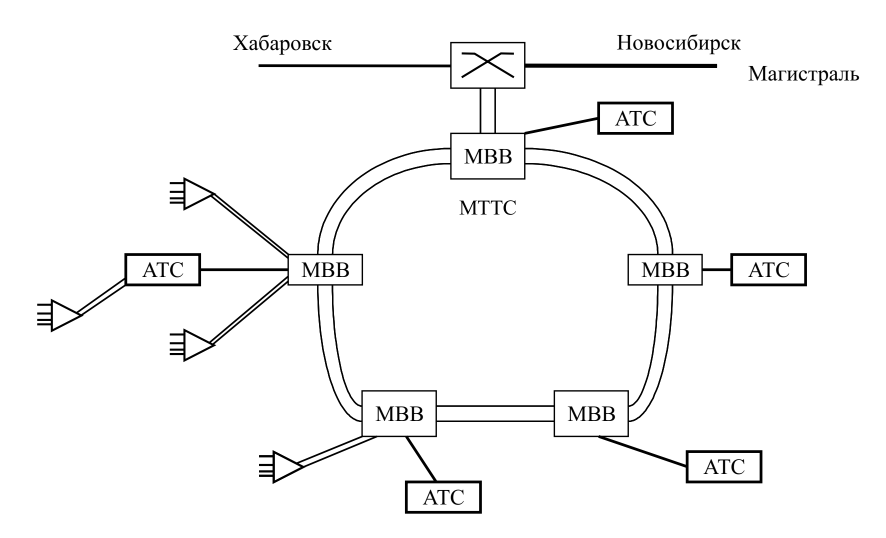


Рис. 4.74 – Транспортные сети SDH

— Выносной концентратор (ВК); — Кросс-коннектор; МВВ — Мультиплексор ввода-вывода

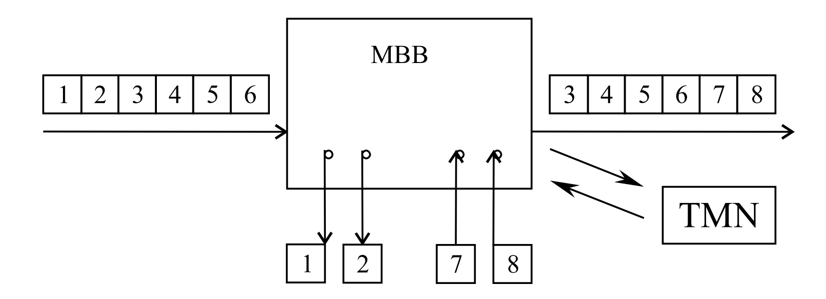


Рис. 4.75 – Работа мультиплексора ввода-вывода

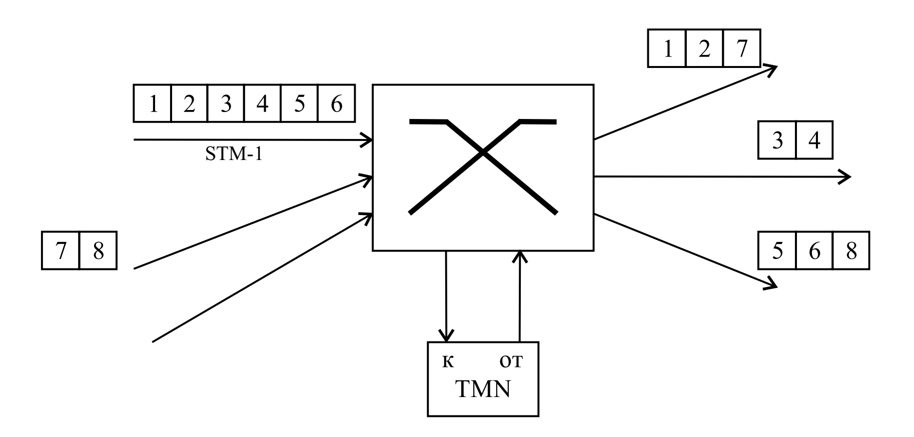


Рис. 4.76 – Работа кросс-коннектора



Выводы

Цифровой сигнал формируется при выполнении 3-х операций: дискретизации во времени, квантования по уровню, кодирования. При дискретизации во времени,

в соответствии с теоремой Котельникова, для телефонного сигнала интервал дискретизации составляет 125 мкс, а частота дискретизации 8 кГц. При квантовании по уровню чаще всего применяют неравномерное квантование, при котором для каждого отсчета формируется информационный байт и скорость информации будет составлять 64 кбит/сек.

При кодировании чаще всего используется импульсно-кодовая модуляция с бинарными кодами, а так же многоуровневая модуляция, когда за одну импульсную посылку передается несколько бит информации.

Наиболее распространенный способ группообразования — временное разделение каналов (ВРК).

Для снижения энергетических потерь при передаче телекоммуникационных сигналов на большие расстояния применяется принцип линейного кодирования. Наиболее распространенными линейными кодами являются биполярные линейные коды, такие как коды с чередованием полярности импульсов и биимпульсные коды.

Для организации передачи многих сигналов по одной линии связи в цифровых системах передачи используется временная синхронизация, которая включает в себя тактовую, цикловую и сверхцикловую синхранизацию. Тактовая синхронизация определяет темп или скорость передачи и временной синхронизм передатчика и приемника. Цикловая синхронизация определяет начало и последовательность передачи информации в совокупности каналов.

В системе плезиохронной цифровой иерархии первичным цифровым каналом является структура ИКМ-30/32. В ней содержится 30 информационных и 2 служебных канала. Общая скорость передачи информации 2,048 Мбит/сек. Длительность цикла 125 мкс.

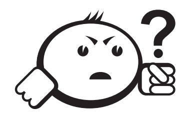
Для увеличения скорости передачи информации по одному цифровому каналу используют принцип объединения цифровых потоков. Для этого используют мультиплексирования с использованием запоминающего устройства, когда 4 входных потока записываются параллельно, а считываются последовательно. Скорость считывания так же увеличивается в 4 раза. Такая процедура повторяется несколько раз. При этом формируется плезиохронная цифровая иерархия (PDH): ИКМ-30, ИКМ-120, ИКМ-480, ИКМ-1920.

Для дальнейшего увеличения скорости передачи в цифровых системах используют новую синхронную цифровую иерархию (SDH). Основные принципы этой иерархии:

- существенное увеличение скорости передачи (первичный цифровой поток имеет скорость 155,52 Мбит/сек.);
- для организации этой иерархии используется временное разделение каналов;
- контейнерный способ упаковки информации;
- синхронности, когда для всех телекоммуникационных систем в мире используется один высокостабильный тактовый генератор.

К основным достоинствам цифровых методов передачи относятся:

- высокая помехоустойчивость;
- возможность учета количества передаваемой информации независимо от ее вида.



Контрольные вопросы по главе 4

1. Почему цифровой сигнал должен быть «счетным»?
2. Чему ровна амплитуда дискретного сигнала?
3. Уменьшается ли отношение сигнал-шум при неравномерном квантовании?
4. Назовите причины высокой помехоустойчивости в ЦСП.
5. Какое преимущество реализуется при применении в ЦСП биполярных сигналов?
6. Почему цикловый синхросигнал имеет сложную структуру?
7. В чем суть процедуры согласования скоростей при объединении цифровых потоков?
8. Чем технология SDH принципиально отличается от PDH?

Глава 5

ЛИНИИ СВЯЗИ

5.1 Кабельные линии связи

Основой телефонных сетей, сетей передачи данных, кабельного телевидения являются кабельные линии передачи. В настоящее время на магистральных, зоновых сетях и сетях доступа используются воздушные линии (ВЛ), симметричный кабель (СК), коаксиальный кабель (КК), волоконнооптические линии связи (ВОЛС). Их основные характеристики приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики кабельных линий связи

Тип кабеля	**Частотный диапазон, МГц**	**Длина усилит. участка, км**	**Применение**
ВЛ	0,1	1–50	Сельская связь Зоновая связь
СК	1	3–20	Сети доступа Зоновая связь
КК	0,05–300	3–10	Кабельное телевидение Магистральная связь
ВОЛС	$1–10^5$	1–200	Зоновая связь Сети доступа

В кабельных линиях связи используются разнообразные режимы передачи. Чаще всего применяется однополосный четырехпроводный. При этом встречные цепи (провода) для симметричных кабелей помещаются в разных многопарных кабелях, а в коаксиальных линиях и в ВОЛС в одном и том же. В воздушных линиях применяются двухпроводный и двухполосный режимы передачи.

Требования, предъявляемые к линиям связи:

- дальность действия до 12500 км в России и 25000 км на международных линиях;

- высокая скорость передачи (до 100 Гб/с);
- способность передавать различные виды информации (телевидение, телефония, данные и др.);
- высокая помехозащищенность от внешних и взаимных полей;
- стабильность электрических параметров, надежность связи.

5.2 Линии связи на симметричном кабеле

Электрический кабель — это электротехническое изделие, содержащее изолированные друг от друга проводники, объединенные в одну конструкцию. В качестве изоляции используются бумага, полистирол, полиэтилен. Для обеспечения прочности, целостности и защиты от воздействий внешней среды провода заключены в общую герметичную оболочку. Чаще всего оболочка выполнена из пластмассы или металлопластика. Поверх оболочки помещается защитный покров, выполненный из металла или пластмассы.

Число пар проводников в кабеле может быть различным от 1 до 3000. В телефонии при домовой или квартирной разводке используются однопарные кабели ТРП («лапша»). Они объединяются в распределительных коробках (РК). Кабели, которые идут от группы абонентов (подъезд дома, офис учреждения и т. п.), содержат 10 и более пар. Эти кабели объединяются в распределительных шкафах (РШ) (рис. 5.1).

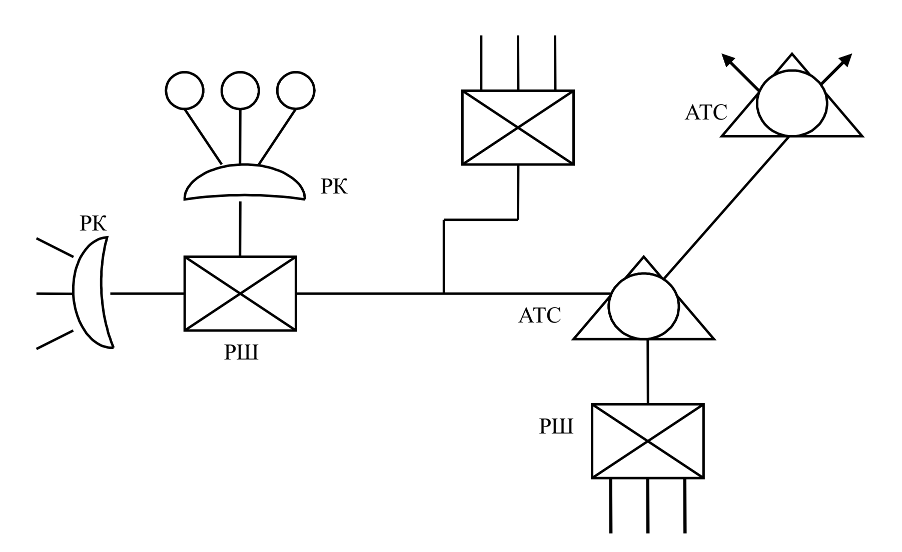


Рис. 5.1 – Схема участка городской телефонной сети

От шкафа к АТС идут кабели с числом пар от 100 до 3000.

В компьютерных сетях при построении локальных вычислительных сетей используются кабели с числом пар равным 4 (кабели UTP-3, UTP-5). В то же время существуют многопарные кабели с большим числом пар.

Примеры поперечных сечений некоторых применяемых кабелей приведены на рис. 5.2.

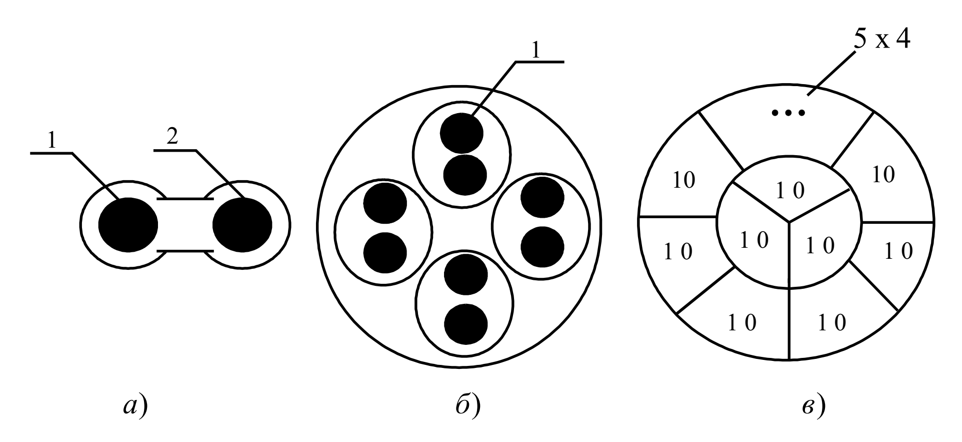


Рис. 5.2 – Поперечные сечения симметричных кабелей:
а) однопарный, *б*) четырехпарный, *в*) стопарный;
1 — проводник, 2 — изоляция

В стопарном кабеле (рис. 5.2, *в*) в каждой из 10 ячеек помещено пять двухпарных кабелей. Кабели, применяемые в компьютерных сетях, называют «витой парой».

Рассмотрим процессы передачи электромагнитных волн по двухпроводной симметричной линии. Структура силовых линий электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей изображена на рис. 5.3.

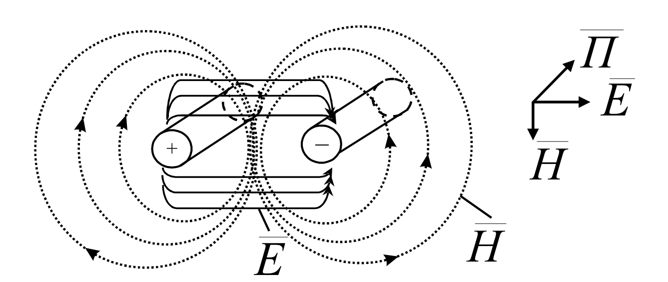
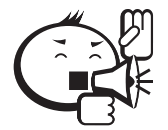


Рис. 5.3 – Силовые линии векторов напряженности
электрического и магнитного полей

Здесь силовые линии поля $\vec{E}$ начинаются и заканчиваются на проводниках. Силовые линии поля $\vec{H}$ непрерывны и замкнуты вокруг проводников с током I.



Поскольку структура двухпроводной линии открытая, то часть силовых линий уходит от системы проводников. Это способствует взаимодействию поля симметричной линии с другими соседними проводниками (наводки) и излучению электромагнитной энергии, когда силовые линии полей $\vec{E}$ и $\vec{H}$ отрываются от проводников. Эффекты излучения и наводки увеличиваются с ростом частоты.

Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ перпендикулярны друг другу и вектору Пойнтинга $\vec{П}$, характеризующему плотность потока мощности в каждой точке среды распространения

электромагнитной волны. Поэтому основная волна двухпроводной линии является поперечной электромагнитной волной ТЕМ или Т.

Рассмотрим параметры такой волны:

Фазовая скорость для среды без потерь — $V_{\text{ф}} = \dfrac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}$, где ε, μ — абсолютные электрическая и магнитная проницаемость среды.

В среде с потерями

$$V_{\text{ф}} = \frac{\omega}{\beta}, \tag{5.1}$$

где β — коэффициент фазы или постоянная распространения,

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \cdot \varepsilon^2}}\right) + 1}, \tag{5.2}$$

а σ — проводимость среды.

Нетрудно увидеть, что среда с потерями обладает дисперсией, когда фазовая скорость зависит от частоты

$$V_{\text{ф}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma^2}{\omega^2 \cdot \varepsilon^2}}\right) + 1}}. \tag{5.3}$$

Зависимость фазовой скорости от частоты приведена на рис. 5.4.

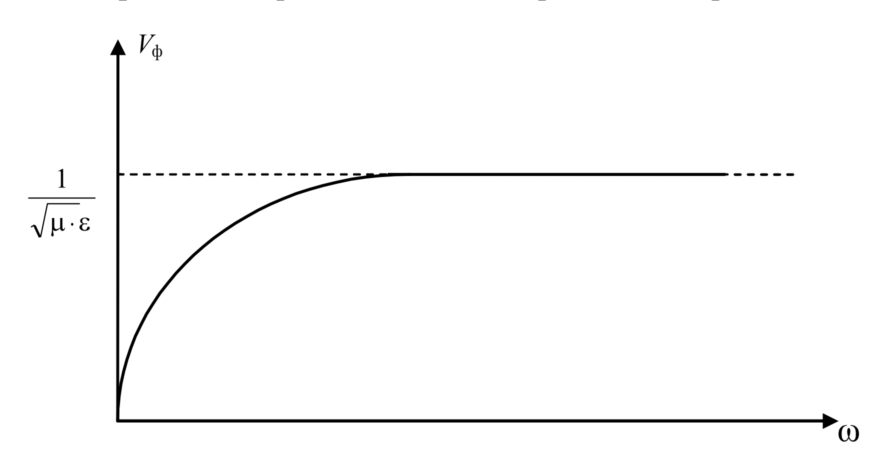


Рис. 5.4 – Зависимость фазовой скорости ТЕМ волны в среде с потерями

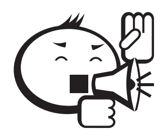
Волновое сопротивление для среды с потерями

$$Z_T = \sqrt{\frac{\iota \cdot \omega \cdot \mu}{\sigma + \iota \cdot \omega \cdot \varepsilon}} \tag{5.4}$$

также зависит от частоты при большой проводимости диэлектрика, что может наблюдаться на линиях с большим сроком действия, и подверженного действию влаги.

На высоких частотах волновое сопротивление постоянно и равно

$$Z_T = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}.$$



Затухание в симметричной двухпроводной линии определяется несколькими факторами:

- омические потери, которые увеличиваются с частотой благодаря поверхностному эффекту;
- потери за счет излучения и наводок на соседние металлические проводники, которые тоже возрастают с увеличением частоты;
- потери в диэлектрической среде, связанные с ее неидеальностью, наличием проводимости σ ($\mathrm{tg}\ \delta \neq 0$). Эти потери также возрастают с частотой.

В прикладной теории симметричных кабелей пользуются эквивалентными схемами (рис. 5.5).

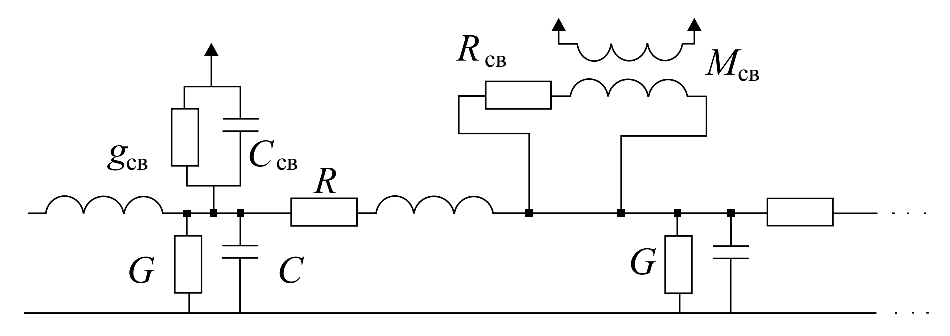


Рис. 5.5 – Эквивалентная схема симметричной двухпроводной линии

На этой схеме сама линия характеризуется погонными параметрами: реактивностями L и C, активным сопротивлением R (омические потери) и активной проводимостью G (потери в диэлектрике). Связь с другими линиями учитывается с помощью емкости $C_{св}$ и проводимости $g_{св}$ (емкостная связь через электрическое поле) и взаимоиндукции $M_{св}$ и сопротивления $R_{св}$ (индуктивная связь через магнитное поле).

Для линии без потерь эти параметры, которые называют первичными, выражаются так:

$$R = 0,$$

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cdot \ln\left[\frac{d-r}{r}\right],$$

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma}{\ln[(d-r)/r]},$$

$$C = \frac{\pi \cdot \varepsilon}{\ln[(d-r)/r]},$$

где d — диаметр проводов, r — расстояние между ними.

В линиях с потерями выражения для G и практически не меняются, а выражения для R и L существенно усложняются.

Среди волновых параметров, которые называют вторичными, чаще всего пользуются комплексным коэффициентом распространения

$$\dot{\gamma} = \alpha + \iota \cdot \beta = \sqrt{(R + \iota \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + \iota \cdot \omega \cdot C)}$$

и комплексным волновым сопротивлением

$$\dot{Z}_B = \sqrt{(R + \iota \cdot \omega \cdot L) / (G + \iota \cdot \omega \cdot C)}.$$

Эти параметры в отличие от тех, что были приведены выше для TEM волны, могут учитывать поверхностный эффект и эффект близости других проводников. Однако качественные зависимости для фазовой скорости, волнового сопротивления и затухания в линии остаются теми же. Для примера на рис. 5.6 приведены типичные зависимости для затухания и волнового сопротивления симметричной двухпроводной линии для разных значений диаметра медного провода d.

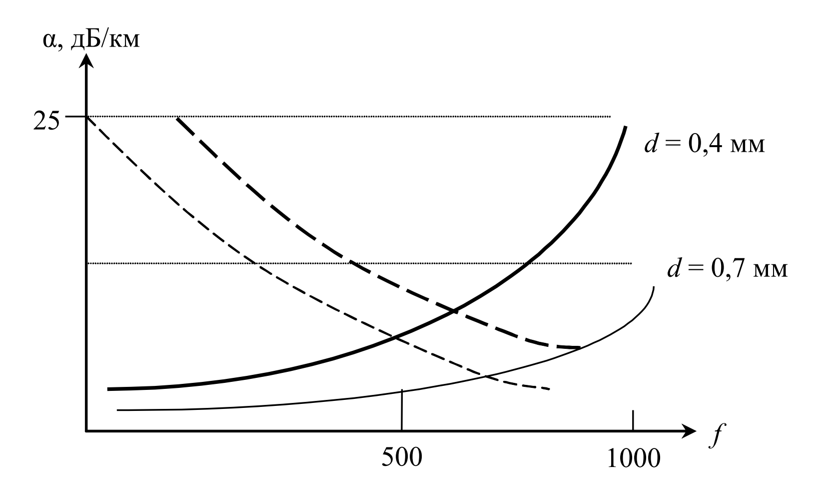
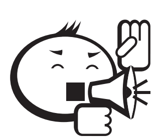


Рис. 5.6 – Частотные зависимости затухания и волнового сопротивления симметричной линии



Приведенные зависимости доказывают, что обычные двухпроводные линии можно использовать в диапазоне до 300–500 МГц, но при этом надо решать задачу компенсации частотных искажений.

Рассмотрим подробнее явление взаимного влияния электромагнитных полей в многопарных кабелях (рис. 5.7). Здесь в первой линии имеется источник сигнала U_{10}. При прохождении сигнала по линии во второй линии за счет наводки возникает ЭДС $\Delta U_э$. Напряжение $\Delta U_э$ приводит к появлению токов на ближнем $I_{ОЭ}$ и на дальнем $I_{LЭ}$ концах.

Одновременно за счет наводки по магнитному полю во второй линии появляется ток $I_М$. Самое интересное заключается в том, что на ближнем конце токи наводок $I_{ОЭ}$ и $I_М$ синфазны, в то время как на дальнем конце они противофазны. Эти фазовые соотношения показаны на рис. 5.8.

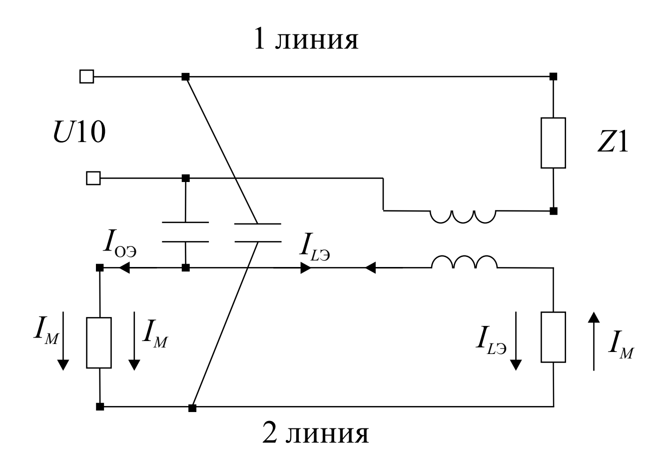


Рис. 5.7 – Взаимное влияние в двухпарном кабеле

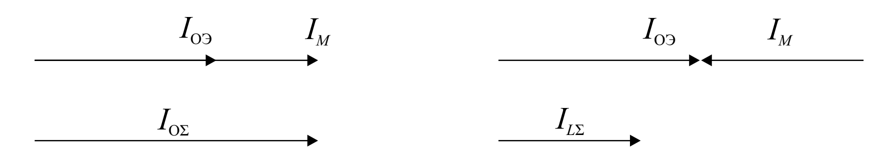


Рис. 5.8 – Фазовые соотношения между составляющими наводок

На самом деле, в многопарных электрических кабелях помимо реактивных составляющих наводки имеют и активные составляющие. Их учет приведет к тому, что фазовые соотношения и векторные диаграммы, приведенные на рис. 5.8, изменятся. Тем не менее основной вывод останется: наводка на ближний конец будет больше, чем на дальний.

Анализ частотных зависимостей взаимного влияния дает следующие результаты (рис. 5.9)

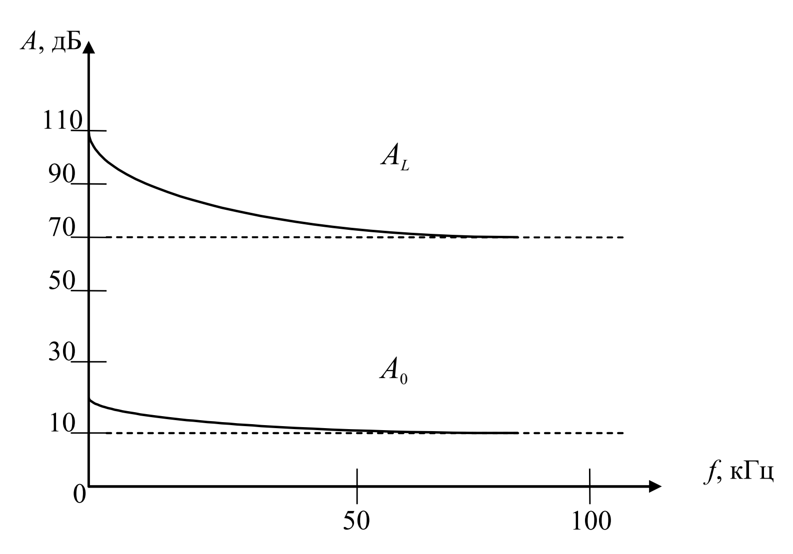


Рис. 5.9 – Частотные зависимости переходного затухания

Переходное затухание определяется в виде отношения мощности сигнала на входе P_{10} к мощностям помехи на ближнем P_{20} и дальнем P_{2L} концах

$$A_0 = 10\lg\left|\frac{P_{10}}{P_{20}}\right|,$$

$$A_L = 10\lg\left|\frac{P_{10}}{P_{2L}}\right|.$$

Как A_0 так и A_L уменьшаются с ростом частоты, однако переходное затухание на дальнем конце больше (лучше отношение сигнал — помеха), существенная разница между A_0 и A_L на рис. 5.8 объясняется затуханием в линии.

Кроме частотных зависимостей взаимного влияния необходимо знать, как меняется соотношение сигнал — помеха от длины линии l. На рис. 5.10 приведены типичные зависимости для переходного затухания на ближнем конце A_0 и защищенности $A_З = 10\lg P_{1l}/P_{2l}$.

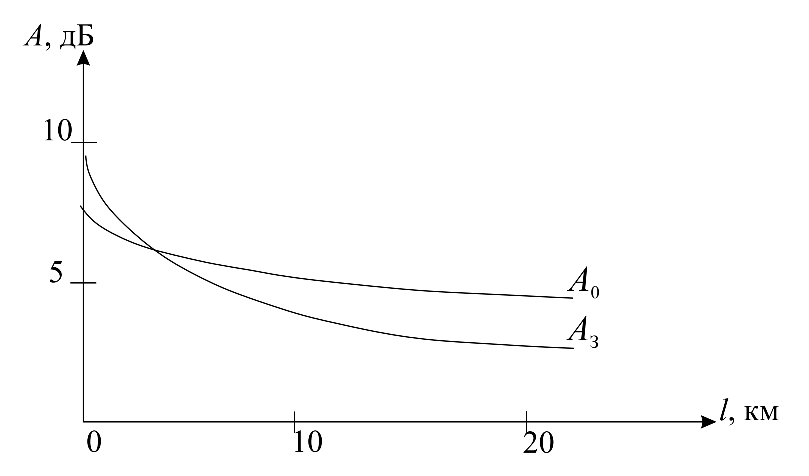


Рис. 5.10 – Зависимости взаимного влияния от длины линии

Помеха на ближний конец сначала уменьшается, поскольку ее составляющие от разных участков линии приходят с разными фазовыми сдвигами (рис. 5.11, *а*), а потом стабилизируется.

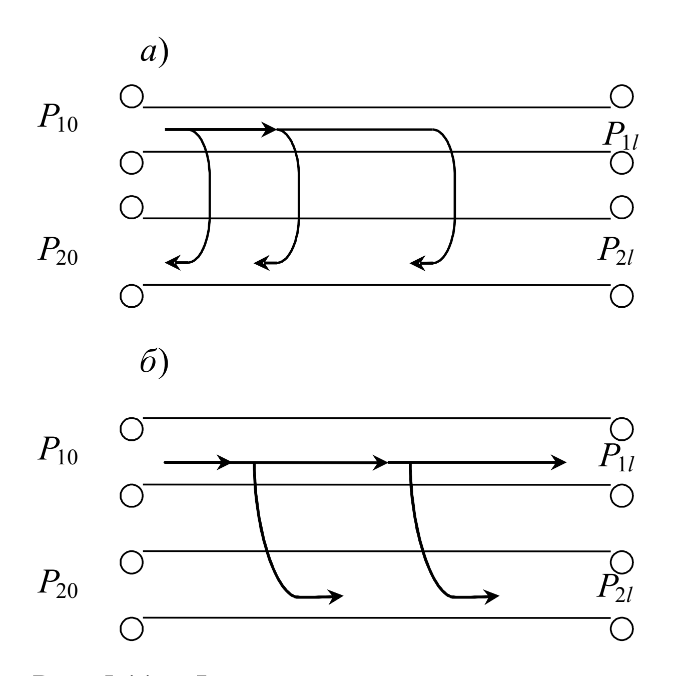


Рис. 5.11 – Формирование сигналов наводок

При анализе соотношения сигнал — помеха на дальнем конце следует учитывать следующие факторы:

- электрическая и магнитная составляющие наводки находятся в противофазе;
- наводки с разных участков линии накапливаются по ее длине (рис. 5.11, *б*);
- сигнал и наводка по мере распространения затухают. Коэффициент затухания, выраженный в децибелах, пропорционален длине линии l.

Для уменьшения наводок и взаимного влияния жилы в кабелях скручиваются, причем каждая пара может иметь свой шаг скрутки d, который составляет 150–800 мм в зависимости от типа кабеля.

Существенное влияние на первичные и вторичные параметры кабелей, на их нормальное функционирование оказывают условия их эксплуатации. Вследствие нарушения герметичности оболочки происходит увлажнение сердечника кабеля, и это ведет к увеличению проводимости среды, увеличению собственной емкости и взаимных емкостей. Увеличивается затухание в линии, изменяется волновое сопротивление, возрастают взаимные влияния между парами.

Приведем технические характеристики некоторых кабелей (табл. 5.2): телефонных кабелей для городских телефонных сетей с пластмассовой изоляцией ТПП, кабелей для сельской связи КСПП.

Таблица 5.2 – Характеристики многопарных кабелей

Тип кабеля	**Диметр провода, мм**	R_0, Ом/км	C, нФ/км	α, дБ/км	Z_B, Ом
ТПП	0,4	139	45	1,54	1164
	0,7	45	45	0,88	676
КСПП	0,9	56,8	38	–	130
	1,2	31,6	43	–	113

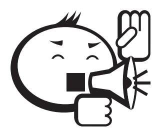
Кабели для компьютерных сетей:

- неэкранированная витая пара третьей категории UTP — 3, содержит 4 пары проводов. Шаг скрутки — девять витков на метр. Скорость передачи данных до 10 Мб/с;
- неэкранированная витая пара пятой категории UTP — 5.

Волновое сопротивление в диапазоне частот до 100 МГц — 100 Ом. Величина перекрестных наводок более — 74 дБ на частоте 150 кГц и — 32 дБ на частоте 100 МГц. Затухание меняется от 0,8 дБ до 22 дБ в диапазоне частот 50 кГц–100 МГц на длине 100 м. Активное сопротивление кабеля 0,1 Ом/м, а емкость 0,056 нФ/м.

5.3 Волоконнооптические кабели

Оптический кабель представляет из себя скрученные оптические волокна (4–32 штуки) из кварцевого стекла. В них используется явление полного внутреннего отражения. Работают волокна в инфракрасном диапазоне при длине волны $\lambda =$ $= 0{,}85 - 1{,}6$ микрометров. Этим длинам волн соответствует диапазон частот 170–350 Терагерц или $(1{,}7–3{,}5)10^5$ ГГц.



Чрезвычайно малая длина волны и чрезвычайно высокие значения несущей частоты и определяют уникальные возможности оптических волокон для передачи информации. Действительно, высокие значения несущей частоты позволяют передавать сигналы с полосой частот 1–10 ТГц и более. Это соответствует длительности импульсов 0,1–1 пикосекунды или пропускной способности канала связи 1000–10000 Гбит/с. Конечно, такие потенциальные возможности оптических линий связи не так просто реализовать в полной мере, но даже небольшая доля от потенциальной пропускной способности дает таким линиям связи громадные преимущества.

В радиоэлектронике, связи волновые процессы, как правило, реализуются в устройствах, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Не являются исключением и оптические волокна. Для достижения предельных характеристик размеры поперечного сечения волокна должны не превышать (3–4) λ. С одной стороны, это создает трудности при изготовлении волокон, с другой — существенно минимизирует поперечные размеры линий связи, поскольку размеры оптических передатчиков и приемников должны быть согласованы с сечением оптического волокна. Малые размеры волокон позволяют размещать их в одном оптическом кабеле десятками и сотнями.

Основной элемент оптического кабеля — волоконный световод — тонкое двухслойное цилиндрическое волокно. Оно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления n_1 и n_2 (рис. 5.12).

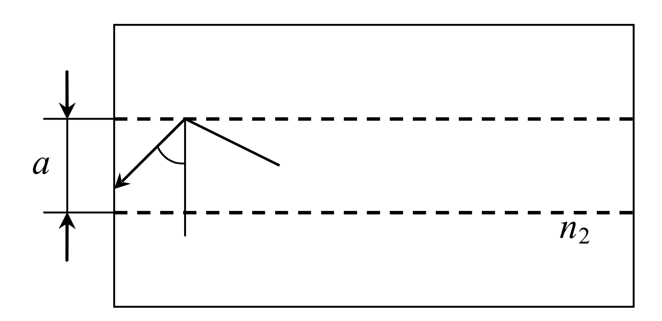


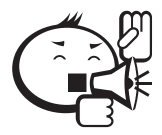
Рис. 5.12 – Продольное сечение оптического волокна

Так как $n_1 > n_2$, то при углах, больше угла полного внутреннего отражения $\theta_B(\sin\theta_B = n_2/n_1)$, оптические лучи полностью отражаются от границы раздела двух сред.

Оптическое волокно может обойтись и без оптической оболочки. При этом показатель преломления воздуха $n_2 = 1$ и условия полного внутреннего отражения будут выполнятся даже в большем диапазоне углов θ. Однако на практике оптическое волокно должно быть изолировано от других волокон и защищено от внешней среды. Обычно в качестве защитной оболочки применяют полимерные материалы. У этих материалов оптические свойства (показатель преломления и коэффициент затухания) существенно отличаются от характеристик волокна и условия полного внутреннего отражения нарушаются. Поэтому в качестве развязки и вводят оп-

тическую оболочку. Если переход от области с показателем преломления n_1 к n_2 происходит резко, то волокно называют ступенчатым.

Изготовление двухслойного оптического волокна не представляет больших проблем. В процессе получения оптической заготовки кварцевого стекла из газовой среды кремния и кислорода в газовую смесь добавляют компоненты, которые при осаждении на цилиндрическую поверхность металлической трубки меняют показатель преломления стекла. Эти изменения не столь значительны. Например, $n_1 = 1{,}465$, а $n_2 = 1{,}46$. Этого, однако, достаточно для реализации явления полного внутреннего отражения при углах $\theta > 85°$.



Оптические волокна делятся на одномодовые и многомодовые. Согласно волновой теории оптических волноводов в них может распространяться несколько типов колебаний (мод), отличающихся друг от друга структурой электрического и магнитного полей, значением фазовой скорости и волнового сопротивления.

Условие существования только одной моды:

$$\frac{2\pi\alpha\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda} \angle 2{,}405.$$

Для типичного случая $n_1 = 1{,}5$ и $n_2 = 1{,}49$, максимальное значение диаметра сердцевины $2a$ равно 6,8 мкм при длине волны $\lambda = 0{,}85$ мкм и 12,8 мкм при $\lambda = 1{,}6$ мкм.

Одномодовый и многомодовый режим можно приближенно интерпретировать и в рамках лучевой теории (рис. 5.13).

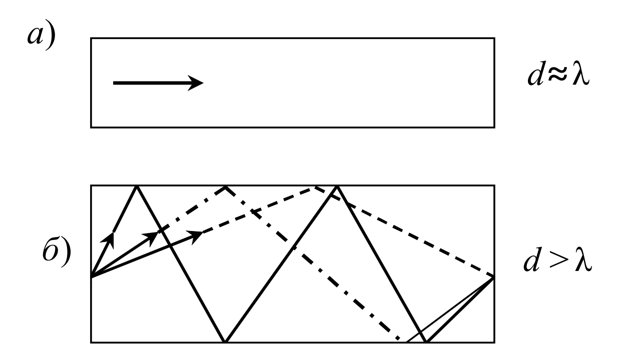


Рис. 5.13 – Одномодовый (*а*) и многомодовый (*б*) режимы передачи

Здесь в многомодовом режиме для одного сигнала существует несколько одновременно распространяющихся лучей света, которые проходят путь в волокне за разные интервалы времени.

Излучение оптического передатчика (светодиода или лазера) вводится в волокно, как правило, с торца (рис. 5.14).

Телесный угол θ_A, связанный с углом полного внутреннего отражения θ_B, определяет пучок лучей, которые будут распространяться в волокне. Для описания про-

цессов ввода излучения и возникновения различных мод вводится понятие числовой апертуры

$$NA = \sin\theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad (5.5)$$

и нормированной частоты

$$V = \frac{2\pi\alpha\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda}. \qquad (5.6)$$

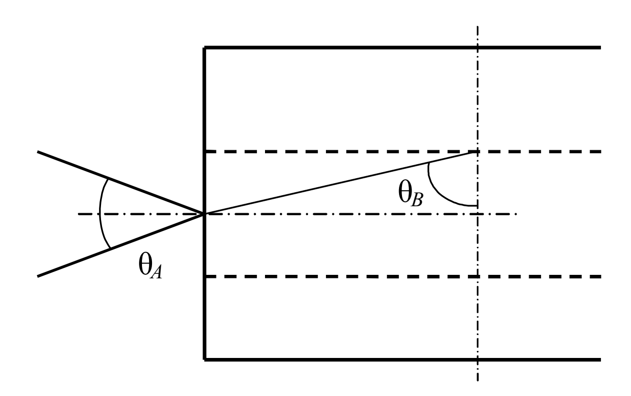


Рис. 5.14 – Ввод излучения в волокно

Одномодовый режим реализуется при $V \leqslant 2{,}405$, а число мод, возникающих в ступенчатом волноводе:

$$N = \frac{V^2}{2}.$$

Из приведенных выражений видно, что число мод в волноводе пропорционально $\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2$.

Одновременное возникновение и распространение нескольких мод существенно снижает пропускную способность волоконно-оптической линии связи. Если обратиться к рис. 5.15, *б*, то нетрудно увидеть, что разные лучи, возбужденные коротким импульсом с длительностью $\tau_{\text{вх}}$, проходят в волокне разный путь и, следовательно, приходят к фотоприемнику с разными задержками. При этом длительность выходного импульса $\tau_{\text{вых}}$ существенно увеличивается. Это явление называют модовой дисперсией и характеризуют уширением $\tau_{\text{мод}}$

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{вых}}^2 - \tau_{\text{вх}}^2}.$$

Модовое уширение тем больше, чем больше число мод N и длина линии связи. Величина уширения импульса за счет модовой дисперсии ступенчатого кабеля достигает 20–50 нс/км.

Одним из способов борьбы с уширением импульса за счет модовой дисперсии является применение градиентных волноводов (рис. 5.15).

Здесь показатель преломления сердцевины уменьшится плавно от центра от максимального значения n_1. Чаще всего применяется параболический профиль

$$n = n_1\left[1 - 2\Delta(r/a)^2\right]^{1/2}, \qquad (5.7)$$

где $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$.

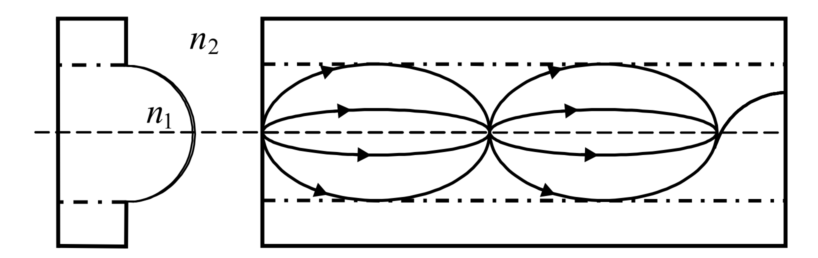


Рис. 5.15 – Градиентный оптический кабель

В этом случае траектория лучей становится искривленной, причем лучи с меньшими углами θ_A идут ближе к оси волокна, где оптическая плотность больше. Поэтому оптическая разность хода разных мод становится меньше чем у ступенчатого волновода. Вследствие этого уменьшается число мод (примерно в два раза) и уширение импульса $\tau_{\text{мод}}$ (примерно в 10–20 раз).

Наряду с модовой дисперсией в оптических волноводах (волокнах) существует и хроматическая дисперсия. Она определяется зависимостью скорости оптических волн от частоты.

$$\upsilon_{\text{опт}} = \frac{\upsilon_{\text{ф}}(\omega)}{n(\omega)}.$$

Числитель в этом выражении характеризует зависимость скорости каждой отдельной моды от частоты (волноводная дисперсия), а знаменатель частотную зависимость показателя преломления среды сердцевины (материальная зависимость).

Результирующее значение уширения импульсов за счет модовой $\tau_{\text{мод}}$, волноводной $\tau_{\text{ВВ}}$ и материальной $\tau_{\text{мат}}$ дисперсий будет

$$\tau = \sqrt{\tau^2_{\text{мод}} + \tau^2_{\text{мат}} + \tau^2_{\text{ВВ}}}.$$

Для многомодовых волноводов решающий вклад в уширение импульса вносит модовая дисперсия, которая может быть рассчитана по следующим формулам:

$$\tau^2_{\text{модст}} = \Delta n_1 \frac{\sqrt{\ell \ell_c}}{c}, \tag{5.8}$$

$$\tau_{\text{модгр}} = \Delta n_2 \frac{\sqrt{\ell \ell_c}}{2c}, \tag{5.9}$$

где ℓ — длина линии,

$$l_c = \begin{cases} 5 - 7 \text{ км}, & \text{для ступенчатого волновода} \\ 10 - 15 \text{ км}, & \text{для градиентного волновода} \end{cases}$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Таким образом, пропускная способность градиентного волокна в $2/\Delta$ раз больше, чем у ступенчатого, и разница может составить два порядка.

В одномодовом волокне модовая дисперсия отсутствует, а материальная и волноводная дисперсии имеют различные частотные зависимости, такие, что на длине волны $\lambda = 1{,}35$ мкм результирующее уширение импульса близко к нулю. В этом

случае можно обеспечить передачу очень коротких импульсов (до 10 псек) и высокую пропускную способность (до 100 Гб/сек).

Уникальные пропускные и дисперсионные свойства оптических волокон могут реализоваться только в том случае, если материал волокна (кварцевое стекло) будет обладать малыми потерями, связанными с поглощением и рассеянием света. В рабочем частотном диапазоне (λ = 1–2 мкм) решающий вклад в затухание вносит поглощение на различных примесях, которое носит резонансный характер. Частотная зависимость затухания волокна, в котором состав примесей существенно уменьшен, приведена на рис. 5.16.

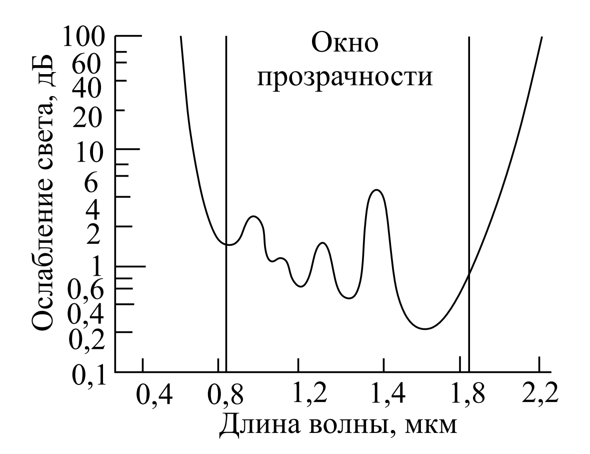
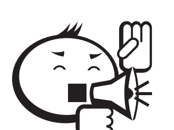


Рис. 5.16 – Зависимость ослабления света в кварцевом волокне от длины волны



Здесь оставшиеся примеси (ионы гидроксильных групп OH) вызывают резонансное поглощение света на длинах волн 0,45; 1,24; 1,34 мкм. Между этими участками есть окна прозрачности, наиболее интересными из которых являются окна при λ = 1,3 мкм, λ = 1,55 мкм. Наименьшее затухание (до 0,3 дБ/км) и наибольшая дальность связи (до 100 км) достигаются при работе линии связи на λ = 1,55 мкм. Однако длина волны λ = 1,3 мкм тоже уникальна тем, что для нее минимум затухания (0,7–1 дБ/км) совпадает с минимумом уширения импульса. Поэтому в сочетании параметров «дальность действия — пропускная способность» эта длина волны также получила широкое применение.

Пропускную способность волоконно-оптических сетей можно увеличить, внедрив технологию плотного волнового мультиплексирования (Dense Wavelength Division Multiplexing — DWDM). Данная технология подразумевает спектральное разделение полосы пропускания волокна на несколько оптических каналов. Таким образом, в одной паре волокон параллельно передается несколько независимых каналов (каждый на своей длине волны), что позволяет повысить пропускную способность системы передачи.

Возможность спектрального уплотнения рассмотрим на примере окна прозрачности 1550 нм. В диапазоне длин волн (1530–1565 нм) полоса пропускания со-

ставляет 4,4 ТГц, которая позволяет реализовать в C-диапазоне до 40 оптических каналов при ширине одного канала 100 ГГц или до 80 оптических каналов при его ширине 50 ГГц. В диапазоне L (1570–1605 нм) максимальное число оптических каналов может достигать 160 при ширине канала 50 ГГц.

Дальнейшее увеличение пропускной способности и дальности действия оптических кабелей можно получить с помощью солитоновых DWDM-систем. Основное свойство оптического солитона — возможность распространения оптического импульса без дисперсионного расплывания. Солитон — это модулированный по интенсивности оптический импульс, который за счет нелинейного взаимодействия между спектральными составляющими поддерживает неизменной форму оптического сигнала по мере его распространения в волокне. При учете нелинейного эффекта перераспределения энергии между спектральными составляющими можно избежать дисперсионного расплывания сигнала, распространяющегося вдоль волокна. Данная технология представляется наиболее перспективной для передачи сигнала STM-256 (40 Гбит/с) на большие расстояния. Использование технологии DWDM оправдано для передачи больших объемов трафика.

Современные городские транспортные сети должны поддерживать работу с неоднородным трафиком, в том числе с узкополосным трафиком на базе SDH-систем и широкополосным ATM- и Ethernet-трафиком. Технология DWDM позволяет объединить передачу разнородного трафика. Для этого каждому типу трафика выделяются свой оптический канал или своя длина волны. Можно утверждать, что технология DWDM становится экономически привлекательной при объеме трафика 40 Гбит/с и выше. Однако экономически эффективной она может быть и при объеме 10 Гбит/с. Чтобы лучше понять особенности построения DWDM-сетей в городских условиях, рассмотрим основные функциональные узлы соответствующего оборудования.

Основные узлы DWDM-оборудования

Технология DWDM предъявляет гораздо более жесткие требования к оптическим источникам излучения, нежели SDH. Чтобы соседние каналы не влияли друг на друга, ширина спектра излучения должна быть значительно меньше ширины оптического канала, т. е. на уровне 0,2–0,3 нм. В системах SDH по оптическому кабелю передается только один сигнал на частоте 1310 или 1550 нм. Поэтому требования к стабильности частоты и ширине спектра излучения оптического источника сравнительно невысоки.

Для передачи по одному волокну нескольких сигналов STM необходимо преобразовать их из «формата» SDH в «формат» DWDM. Эту функцию выполняет транспондер. На его вход подается сигнал STM (или ATM, IP), который необходимо преобразовать в «формат» DWDM, т. е. в сигнал со строго фиксированной длиной волны и узким спектром излучения. Оптический STM-сигнал преобразуется в электрическую форму, восстанавливается форма сигнала, и далее выполняется обратное электрооптическое преобразование в «формат» DWDM. Для восстановления формы сигналов используется 3R-преобразование: 1R (re-amplification) — усиление сигнала, 2R–1R плюс восстановление формы сигналов (re-shaping), 3R–2R плюс ресинхронизация (re-timing). Для передачи сигнала на сравнительно небольшие

расстояния, в пределах города или области, достаточно использовать транспондеры с функцией 2R.

Можно выделить четыре основных узла оборудования DWDM:

- оптический терминальный мультиплексор (Optical Terminal Multiplexer — OTM),
- регенератор (Regenerator — REG),
- оптический усилитель (Optical Line Amplifier — OLA),
- оптический мультиплексор ввода-вывода (Optical Add Drop Multiplexer — OADM).

Основными узлами оптического терминального мультиплексора являются оптический мультиплексор (OM) и оптический демультиплексор (OD). В направлении передачи OM мультиплексирует сигналы с фиксированными длинами волн, сформированные на выходе транспондеров, в групповой сигнал, который и передается по оптическому кабелю. На приеме OD демультиплексирует групповой сигнал на сигналы с фиксированными длинами волн, которые подаются на транспондеры.

Оптический регенератор используется для восстановления формы группового сигнала, подавления джиттера и улучшения соотношения сигнал/шум. С этой целью используется преобразование O-E-O (Optical-Electrical-Optical). Групповой сигнал на входе REG преобразуется в электрическую форму, проводится 3R-восстановление формы сигнала, и далее он опять преобразуется в оптическую форму. Регенератор строится на базе двух OTM-мультиплексоров, включенных по схеме back-to-back через транспондеры. Такая конфигурация позволяет осуществить ввод-вывод всех оптических каналов.

Оптический усилитель соответственно усиливает групповой сигнал без восстановления его формы. При передачи информации на большие расстояния усилители оснащают функцией эквалайзера — выравнивания мощности оптических каналов. В городских условиях функция эквалайзера не используется, и это уменьшает стоимость усилителя. Оптический усилитель наиболее дешевый узел оборудования DWDM (в сравнении с OTM-мультиплексором и регенератором).

Оптический мультиплексор ввода-вывода строится на базе оптического усилителя, в который добавляется пассивная оптическая плата, позволяющая осуществить ввод-вывод ограниченного числа оптических каналов с фиксированными длинами волн. Она представляет собой брегговскую решетку с периодическими изменениями индекса преломления, которые достигаются за счет насечек на оптоволоконном кабеле, сделанных с помощью ультрафиолетового излучения. OADM-мультиплексор на базе брегговских решеток позволяет осуществлять ввод-вывод от 1 до 12 оптических каналов. Для остальных каналов он работает как усилитель. Основное преимущество такого мультиплексора по сравнению с OTM-мультиплексором и регенератором — гораздо более низкая его цена.

Особенности использования DWDM в городских условиях. При построении городских транспортных сетей требования к элементам DWDM упрощаются. При передаче сигнала на небольшие расстояния снижаются и требования к усилителям: как правило, не нужна функция эквалайзера, выходная мощность тоже может быть уменьшена. Все это приводит к заметному удешевлению усилителей. В городских сетях DWDM промежуточные узлы работают в режиме усилителей, поэтому

для передачи трафика преобразование О-Е-О осуществляется только на конечных узлах, а в промежуточных узлах — лишь усиление сигнала.

5.3.1 Радиоканалы

В зоновых сетях и сетях доступа широко используется передача информации с помощью беспроводных технологий (радиоканалы и оптическая связь). Рассмотрим здесь основные принципы, достоинства и недостатки радиосвязи. Структурная схема радиоканала приведена на рис. 5.19. Здесь входной цифровой сигнал модулирует несущую частоту передатчика. Высокочастотный сигнал с помощью передающей антенны излучается в свободное пространство. Электромагнитные волны распространяются либо в одном направлении (направленная передача), либо по всем направлениям (широковещательная передача). Приемная антенна выделяет полезный сигнал, далее он усиливается, выделяется из шумов, преобразуется в цифровой код.

Рассмотрим основные достоинства такого способа передачи:

1. Беспроводной режим передачи. В этом случае не требуется прокладка каких-либо кабелей. Поэтому радиоканалы могут применятся в труднодоступных местностях, в условиях горной местности, на море, в условиях городской застройки, когда прокладка кабеля затруднена и т. д.).
2. Связь с подвижными объектами.
3. Покрытие большой территории с помощью одного передающего центра (телевидение, радиовещание, радиодоступ в интернет).
4. Многообразие параметров радиосигналов и электромагнитных волн, позволяющих переносить информацию (амплитуда, фаза, частота радиосигнала, поляризация и направление распространения электромагнитной волны и комбинации этих параметров).

К недостаткам радиоканалов следует отнести:

1. Влияние различных шумов и помех, которые в радиодиапазоне проявляются больше в силу открытости канала передачи.
2. Влияние условий распространения радиоволн (осадки, рефракция, многолучевое распространение и т. д.).
3. Ограниченность частотного ресурса.
4. Ограниченная дальность действия.

Ниже в качестве примера рассмотрим радиорелейные линии связи.

Под *радиорелейной связью* понимают радиосвязь, основанную на ретрансляции радиосигналов дециметровых и более коротких волн станциями, расположенными на поверхности Земли. Совокупность технических средств и среды распространения радиоволн для обеспечения радиорелейной связи образует *радиорелейную линию связи*. Используемые в ней радиоволны имеют два механизма распространения: один — за счет земной радиоволны, второй — за счет тропосферной.

Земной называют радиоволну, распространяющуюся вблизи земной поверхности. Земные радиоволны короче 100 см хорошо распространяются, как правило, только в пределах прямой видимости. Поэтому радиорелейную линию связи на

большие расстояния строят в виде цепочки приемо-передающих *радиорелейных станций* (РРС), в которой соседние РРС размещают на расстоянии, обеспечивающем радиосвязь прямой видимости, и называют ее *радиорелейной линией прямой видимости (РРЛ)*.

На любой РРС устанавливают антенны, приемно-передающую аппаратуру и вспомогательные устройства (аппаратуру телеобслуживания, служебной связи, гарантированного электропитания и др.). Комплекс аппаратуры, обеспечивающий нормальную работу РРЛ, называют *радиорелейной системой*. Для РРЛ разработан ряд типовых радиорелейных систем.

Используемые на РРЛ диапазоны радиочастот обладают рядом достоинств. В каждом из этих диапазонов можно передавать много широкополосных сигналов. В этих диапазонах антенны с большими коэффициентами усиления имеют сравнительно небольшие размеры. Применение таких антенн позволяет получить устойчивую связь при малой мощности передатчика. Спектр внешних помех атмосферного и промышленного происхождения лежит в низкочастотной области. Поэтому в диапазонах применения РРЛ и более высокочастотных таких помех практически нет.

Радиорелейную линию связи строят в виде цепочки приемопередающих РРС. На РРЛ устанавливают передатчики мощностью 0,1...10 Вт, приемники с коэффициентом шума около 10 дБ, антенны с коэффициентом усиления около 40 дБ (площадь раскрыва около 10 м^2). На такой РРЛ между антеннами соседних РРС должна быть прямая видимость. Для этого антенны устанавливают на опорах, чаще всего на высоте 40...10 м. Расстояние между соседними РРС магистральных РРЛ обычно около 50 км.

Основные типы РРС: оконечная (ОРС), узловая (УРС) и промежуточная (ПРС). На ОРС и УРС устанавливают радиопередатчики и радиоприемники (рис. 5.17). В составе радиопередатчика – модулятор Мд и передатчик СВЧ сигнала П, в составе радиоприемника – приемник СВЧ сигналов Пр и демодулятор Дм.

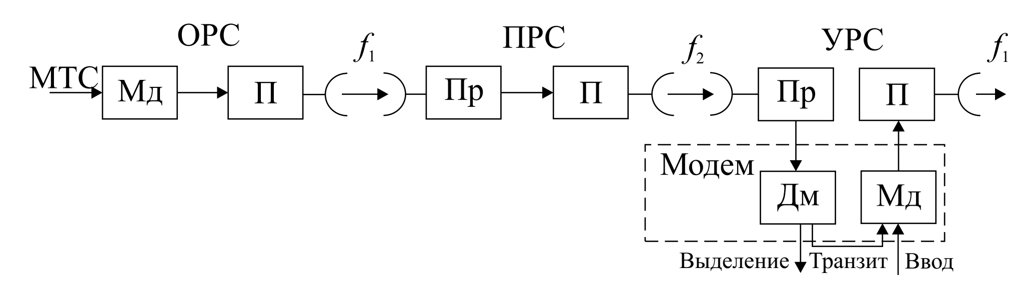


Рис. 5.17 – Структурная схема РРЛ

На ОРС, располагаемых на концах РРЛ, происходит ввод и выделение передаваемых сигналов.

На ПРС происходит ретрансляция радиосигнала: прием, усиление, сдвиг по частоте и передача в направлении следующей РРС.

Часть радиорелейной линии связи между соседними РРС, включающую аппаратуру и среду распространения радиосигнала, называют радиорелейным пролетом.

Разность уровней сигналов на выходе и входе приемопередатчика ПРС превышает 100 дБ. Чтобы предотвратить самовозбуждение этого устройства, радиосигналы одного направления связи на ПРС (УРС) принимают и передают на раз-

ных частотах f_1 и f_2. Частотным сдвигом (частотный разнос) называют величину $f_{сдв} = |f_a - f_1|$. Обычно на магистральных РРЛ $f_{сдв}$ = 266 МГц.

Кроме частотного разноса для устранения самовозбуждения применяют поляризационную развязку. В этом случае антенна передатчика излучает электромагнитную волну с горизонтальной поляризацией, а приемная антенна настроена на волну с вертикальной поляризацией.

В практике РРЛ возможны ситуации, когда сигнал, излучаемый одной станцией (частота f_1), будет приниматься не только соседней станцией, но и следующей за ней. Приемник этой станции настроен так же на частоту f_1. Чтобы избежать этой ситуации, применяют так называемый угловой разнос, когда все станции располагаются не по одной прямой, а в виде зигзагообразной ломаной линии.

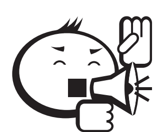
Достоинства РРЛ во многом определяются направленностью антенн (дальность действия) и высокой пропускной способностью при ограниченной полосе пропускания. Рассмотрим эти характеристики подробней.

Зеркальные антенны. Это направленные антенны, содержащие первичный излучатель и отражатель антенны в виде металлической поверхности. Первичным излучателем (или облучателем) называют излучающий элемент антенны, связанный с фидером. На РРЛ используют следующие зеркальные антенны: параболические, рупорно-параболические, двухзеркальные и др.

Принцип формирования направленного излучения рассмотрим на примере передающей параболической антенны (рис. 5.18, *а*). Поверхность отражателя 1 является вырезкой из параболоида вращения и представляет собой металлическое зеркало. С фокусом зеркала F совмещен центр облучателя 2. Фокусное расстояние обозначено F^*. Широко распространены рупорные облучатели, питаемые от волновода 3.

Рупор излучает сферическую волну, которая, отражаясь от отражателя, превращается в плоскую в раскрыве антенны. Ход лучей показан на рис. 5.18, *а* и *в* тонкими линиями со стрелками. Раскрывом называют плоскость S, перпендикулярную фокальной оси MN и ограниченную кромкой зеркала (рис. 5.18, *а*) либо проекцией на нее этой кромки (рис. 5.18, *в*).

В плоскости раскрыва все лучи должны быть параллельны, т. е. иметь одинаковую фазу. Кроме того, амплитуды лучей также должны быть одинаковы. За счет этого мощность излучения концентрируется в направлении, перпендикулярном плоскости раскрыва. Чем больше S, тем уже главный лепесток ДН антенны и больше коэффициент усиления G. На практике амплитуда поля в раскрыве S обычно спадает к краям. Следовательно, в создании направленного излучения участвует не вся апертура S, а ее часть, называемая эффективной площадью антенны.



С целью увеличения пропускной способности РРЛ широкое применение находит квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ). Этот вид манипуляции, по существу, представляет собой сочетание АМ и ФМ, в связи с чем его еще называют амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМ). В случае КАМ изменяется и фаза, и амплитуда несущей. Применяются КАМ четвертого уровня и выше (КАМ-4, КАМ-16 (рис. 5.19), КАМ-64 и т. д.), причем КАМ-4 совпадает с ОФМ четвертого уровня.

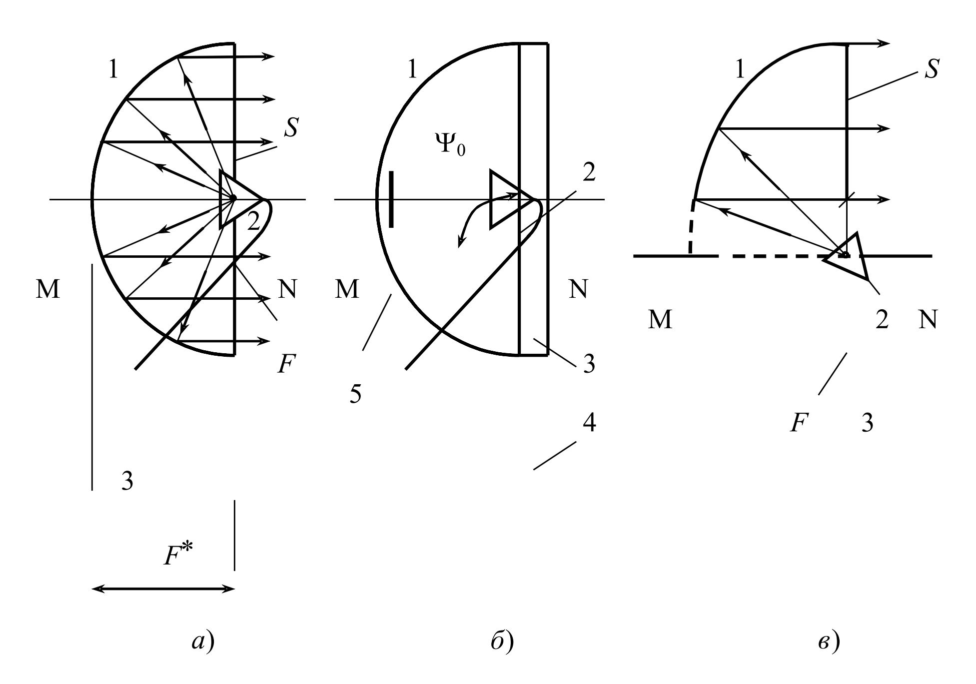


Рис. 5.18 – Схемы параболических антенн:
а — осесимметричной; *б* — осесимметричной улучшенной;
в — неосесимметричной (1 — отражатель; 2 — облучатель; 3 — фидер)

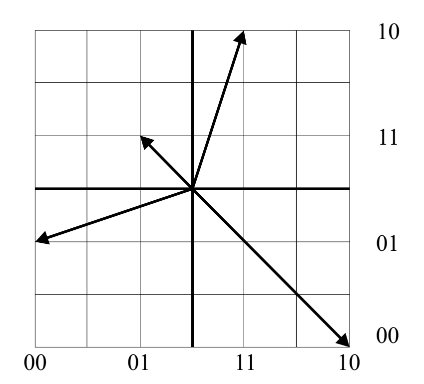


Рис. 5.19 – КАМ-16 с примерами сигнальных точек
квадрибитов 1110, 1000, 0111, 0001

На рис. 5.19 в качестве примера приведены только некоторые точки на амплитудно-фазовой плоскости. Всего этих точек будет 16. В соответствии с теоремой Шеннона при заданной длительности импульса скорость передачи информации увеличится в 4 раза.

Вид модуляции одновременно определяет и ширину излучаемого спектра, а следовательно, требуемую ширину полосы приемопередатчика, и пороговое отношение сигнал/шум в демодуляторе. В настоящее время в РРЛ используются следующие виды модуляции:

- для высокоскоростных РРС (от 155 Мбит/с и выше) — квадратурная амплитудная модуляция с уровнем квантования 64 и выше (64 QAM и выше) либо более сложные методы модуляции, объединяющие модуляцию и кодирование, в частности, решетчатая кодовая модуляция (TCM) и блоковая кодовая модуляция (BCM);

- для среднескоростных РРС — 16 QAM, 32 QAM;
- для низкоскоростных РРС (ниже 34 Мбит/с) — наиболее распространена модуляция QPSK (КАМ-4).



Выводы

В телекоммуникационных системах наибольшее распространение получили линии связи на симметрическом электрическом кабеле, радиоканалы и волоконно-оптические линии связи. Полоса пропускания линий связи на симметричном кабеле не превышает 1 МГц, а скорость передачи информации изменяется от телефонных сигналов до сигналов передачи данных (до десятков Мбит/сек). ВОЛС применяются в магистральных и зоновых сетях с пропускной способностью в десятки и сотни Гбит/сек. Промежуточное значение занимают радиоканалы, в которых скорость передачи информации достигает сотен Мбит/сек., их основное применение — мобильная связь, сети радиодоступа, РРЛ.

Дальность действия линий связи на симметричном электрическом кабеле ограничивается затуханием. Основные причины затухания — омические потери в проводниках и излучение. При обоих механизмах затухание существенно увеличивается с ростом частоты.

Для многопарных электрических кабелей характерно явление помех и наводок. Эти помехи могут быть внешними за счет воздействия внешних электрических и магнитных полей и внутренними за счет перекрестных помех.

В ВОЛС возможны одномодовый и многомодовый режимы передач. Наибольшие преимущества по пропускной способности и дальности действия реализуются в одномодовом режиме.

Основной причиной, ограничивающей пропускную способность ВОЛС, является дисперсия, когда длительность передаваемого оптического импульса уширяется за счет разных эффектов. Основным видом дисперсии является модовая дисперсия, когда различные типы колебаний распространяются с разными скоростями. Существенное снижение дисперсии происходит в одномодовом режиме.

В системах радиосвязи отлично себя зарекомендовали свойства направленности излучения с применением широкоапертурных антенн и многоуровневой амплитудно-фазовой модуляции.



Контрольные вопросы по главе 5

1. Почему в проводных линиях связи дальность действия зависит от частоты?
2. Чем ограничивается скорость передачи информации в симметричном кабеле?
3. Чем объясняется малое затухание сигнала в ВОЛС?
4. Применяется ли ЧРК в системах на ВОЛС?

Глава 6

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

6.1 Коммутация каналов и коммутация пакетов

При распределении цифровых потоков преимущественно используются две технологии коммутации:

1. *Коммутация каналов (КК)*. Здесь (рис. 6.1) между двумя абонентами с помощью цифровых коммутационных устройств устанавливается непосредственное физическое соединение по сквозному каналу, проходящему через узлы ABCD. На время этого постоянного соединения весь ресурс первичного канала закрыт для других абонентов. В каждом узле расположен цифровой коммутатор, функции которого сводятся к следующим двум процедурам (рис. 6.2):

- цифровой поток с одного входного порта коммутатора перенаправляется на один из M выходных портов — случай пространственной коммутации;
- в пределах одного цифрового потока меняется временное положение канальных интервалов.

К достоинствам технологии коммутации каналов следует отнести:

- стабильность соединения;
- фиксированная (постоянная) малая задержка сигнала в канале связи, потому что коммутаторы работают с высоким быстродействием. Это способствует высокому качеству передачи речи.

Недостатки способа коммутации каналов:

- низкая загрузка каналов. Поскольку абоненты ведут диалог и занимают дуплексный канал, то 50% времени уходит на то, что один из абонентов молчит, слушая собеседника. Другие потери приходятся на паузы и высокую избыточность речи. Общая загрузка канала составляет 10–30%;
- отсутствует возможность многоадресной передачи, когда один абонент может сообщить свою информацию целой группе других абонентов.

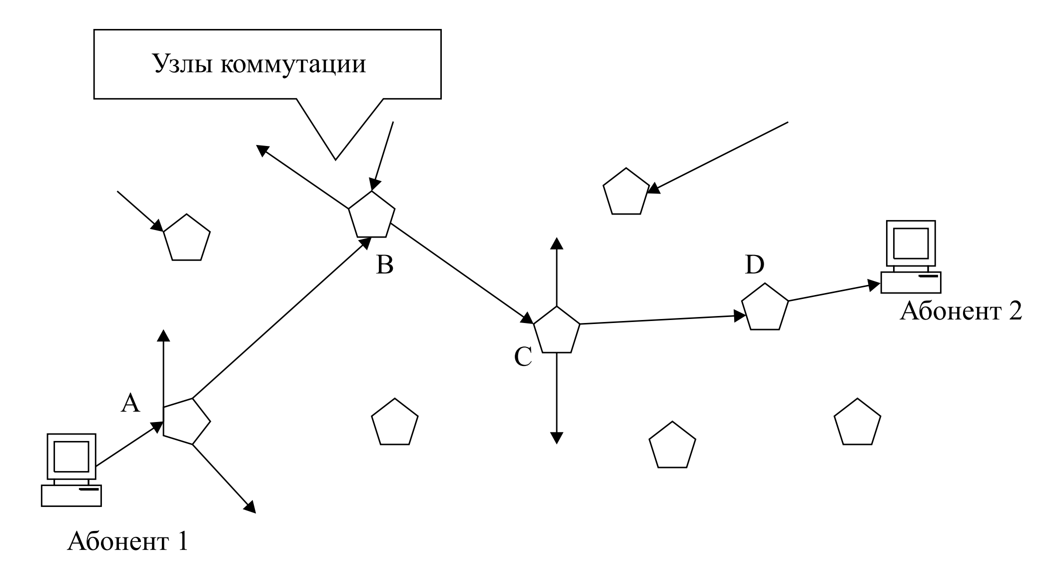


Рис. 6.1 – Коммутация каналов

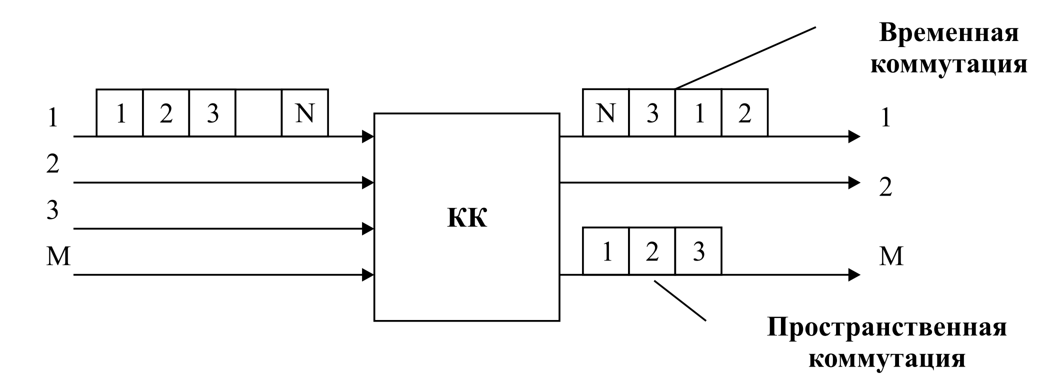


Рис. 6.2 – Цифровая коммутация

2. *Коммутация пакетов (КП)*. Здесь сообщение сначала преобразуется в цифровую форму, а потом разбивается на части (пакеты). Каждый пакет может передаваться самостоятельно, поскольку в его составе содержится адресная информация пункта назначения. Рис. 6.3 иллюстрирует один из способов коммутации пакетов (дейтаграммный). Здесь пакеты с номерами 1, 2, 3, 4 поступают на узел коммутации A, который определяет оптимальный (кратчайший) путь ACDB и отправляет по нему пакет 1. При поступлении пакета 2 ситуация в сети изменилась, путь ACDB не обеспечивает быстрого прохождения и узел A отправляет пакет 2 по другому пути (AFDB). К моменту окончания пакета 2 ситуация в сети восстанавливается и пакеты 3, 4 снова идут по пути ACDB. Может получиться так, что к узлу B пакеты придут не в той последовательности, в которой были отправлены. Узел B восстанавливает порядок следования пакетов.

Основные процедуры при передаче пакетов:

- разбиение сообщения на пакеты;
- запись пакетов в узлах;
- маршрутизация пакетов в соседние свободные узлы.

Достоинства технологии коммутации пакетов:

- высокая загрузка канала (до 100%). Обеспечивается тем, что любые паузы в сообщении одного абонента могут быть заполнены пакетами информации других абонентов;
- возможность многоадресной передачи, так как в заголовке пакета может содержаться разное количество адресов.

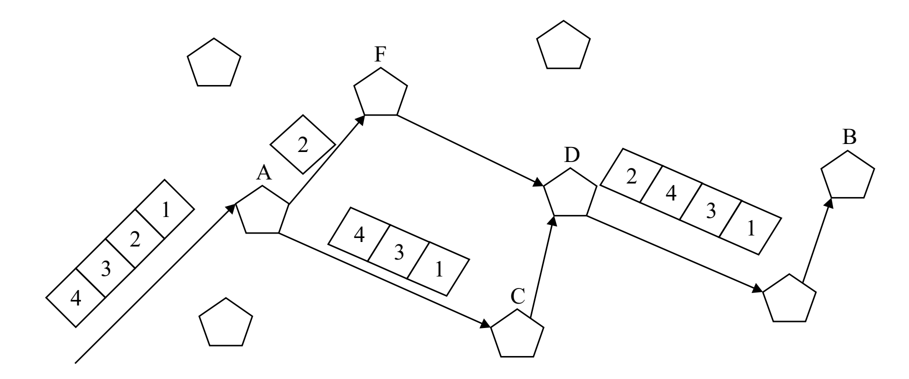


Рис. 6.3 – Коммутация пакетов

Недостатки способа коммутации пакетов:

- перезапись информации в узлах, что увеличивает задержку передаваемых сигналов;
- переменная скорость передачи и переменная задержка, что также связано с буферизацией информации, ограниченным объемом памяти запоминающих устройств и с возможностью различных путей распространения информации.

На рис. 6.4 приведена типичная структура пакета. Он ограничен с двух сторон флагами. Чаще всего это комбинация из восьми бит (например, 011111110). Адресное поле содержит информацию об адресах отправителя и получателя. В поле управления указывается тип пакета, его размер и формат, указания по обработке сигнала и т. п.



флаг	адрес	управление	информация	контрольное поле	флаг

Рис. 6.4 – Структура пакета

В информационном поле передаются непосредственно данные, а контрольное поле предназначено для процедуры обнаружения ошибок посредством передачи определенных кодовых комбинаций, которые проверяются на приемном конце.

6.2 Пространственная коммутация

Основной функцией коммутатора является установление и разрыв соединения между двумя каналами передачи. Каналы передачи могут идти от коммутатора либо к абоненту, либо к другому коммутатору. Поэтому различают местные соединения и транзитные соединения. Пример местного соединения показан на рис. 6.5.

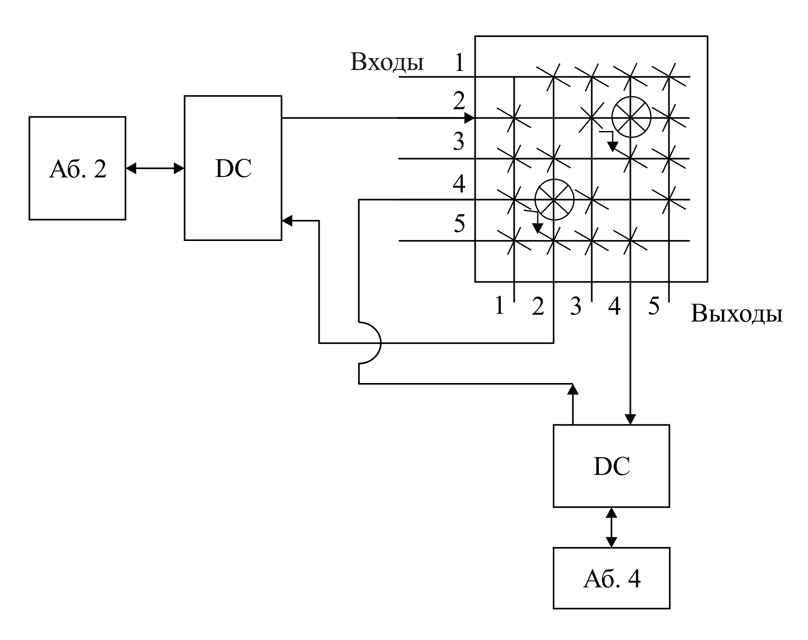


Рис. 6.5 – Коммутация местного соединения

Здесь коммутационная схема является полнодоступной, так как каждый вход может быть соединен с каждым выходом. В этой схеме предполагается двусторонняя связь, поэтому число входов равно числу выходов и геометрия схемы — квадрат. Для каждого соединения предполагается две точки коммутации $i \to j$ и $j \to i$. Одна из диагоналей квадрата $i \to i$ элементы коммутации не содержит. Для каждого абонента предусмотрена дифференциальная система, которая согласует двухпроводное абонентское окончание с четырехпроводным (две двухпроводные линии) на стороне АТС. На рис. 6.5 приведен пример соединения абонента 2 с абонентом 4. Нетрудно увидеть, что для каждого абонента в схеме используются строка и столбец коммутационной матрицы с одноименным номером.

Полнодоступные коммутационные схемы используются только на небольших АТС с числом абонентов N не более 1000. Это связано с большим числом необходимых точек коммутации N_k: $N_k = N^2 - N = N(N-1) \approx N^2$.

Если $N = 1000$, то $N_k = 10^6$, а при $N = 5000$ $N_k = 25 \cdot 10^6$. При таком количестве элементов коммутации сложность и стоимость коммутатора неизмеримо возрастают.

Сократить число коммутационных элементов при большом числе входных линий можно при каскадном включении неполнодоступных коммутационных схем. Примеры таких схем приведены на рис. 6.6.

Это схемы, когда число входов неравно числу выходов (рис. 6.6, *а*) и когда в квадратной структуре не все точки содержат коммутационные элементы (рис. 6.6, *б*). И в том и в другом случае часть выходов не может быть соединена с частью входов. Наиболее очевидна такая ситуация в схеме рис. 6.6, *б*. В прямоугольной

решетчатой структуре неполнодоступность возникает так. Входы 1, 2, 3 могут быть соединены с любым из выходов 1–6, однако встречный канал может быть организован только для трех выходов из шести. Такая невозможность установления соединения при незанятом абоненте называется блокировкой. В связи с этим коммутационные схемы могут быть не блокирующимися или блокирующимися. Простой пример неблокирующейся схемы — квадратная решетка (рис. 6.5) и блокирующейся — прямоугольная решетка (рис 6.6, *а*).

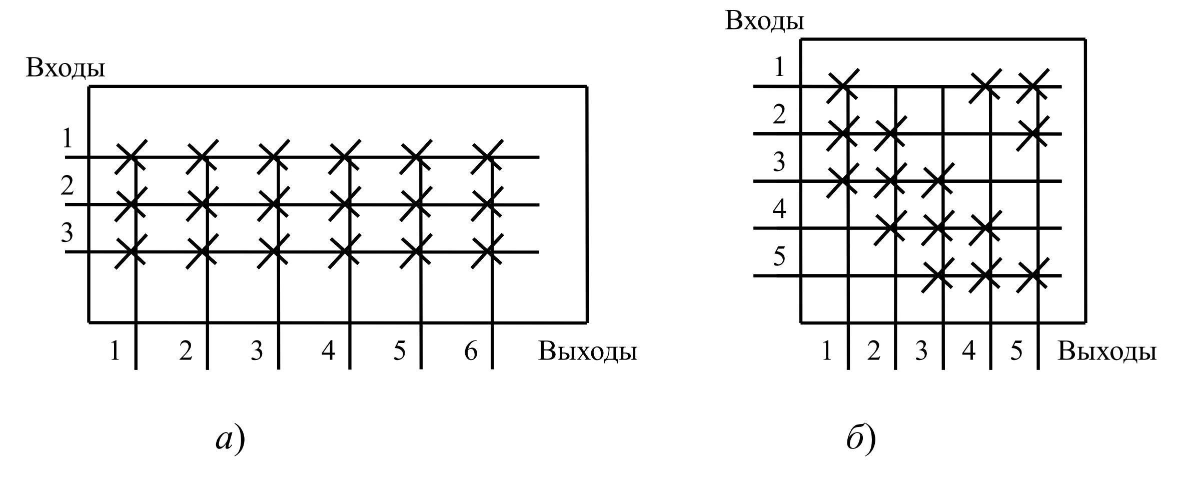


Рис. 6.6 – Неполнодоступные схемы коммутации

Блокирующиеся схемы применяются в следующих случаях:

- при установлении транзитных соединений;
- в многозвенных коммутационных схемах;
- на удаленных концентраторах.

Во всех этих случаях требование обеспечения возможности установления соединения любого входа с любым выходом не является обязательным. Рассмотрим вначале транзитные соединения (рис. 6.7).

Здесь связь абонента *A* с абонентом *B* осуществляется через два коммутатора (две АТС), каждый из которых организован по блокирующейся схеме. Так как вероятность одновременного обслуживания всех входов 1а–6а мала, число выходов в первом коммутаторе меньше, чем входов. Все эти выходы подключены к входам второго коммутатора. При этом транзитное соединение $A \to B$ может осуществляться по разным траекториям:

2а — 1в — 5с
2а — 2в — 5с
2а — 3в — 5с

Выбор этой траектории определяется управляющими устройствами АТС в зависимости от задействования коммутационных элементов в обеих схемах. При этом при большой нагрузке возможен вариант отказа в услуге, когда все линии, соединяющие АТС (1в, 2в, 3в), заняты трафиком от других абонентов. Подобные ситуации возникают и в многозвенных коммутаторах, которые будут рассмотрены в разделе 6.3.

Рассмотрим теперь способы реализации коммутационной матрицы. Обычно в ее узлах стоят электронные управляемые контакты (рис. 6.8). В качестве та-

ких контактов применялись герконы (герметические контакты) или электронные устройства (диоды, транзисторы). Однако все эти устройства имели недостаточную величину контактного отношения R_k/R_∞, где R_k — сопротивление замкнутого контакта, а R_∞ — сопротивление контакта в разомкнутом состоянии. В настоящее время коммутационные схемы с непосредственными контактами есть только в старых электронных АТС. Им на смену пришли цифровые, в которых состояние коммутации создается логическими процедурами передачи состояния («и», «не» и др.).

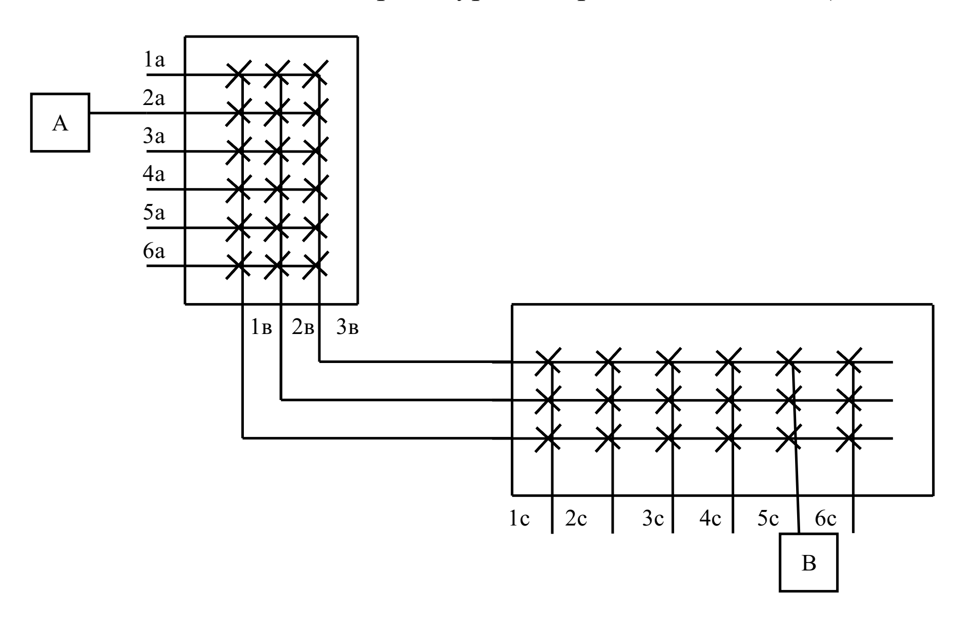


Рис. 6.7 – Транзитное соединение

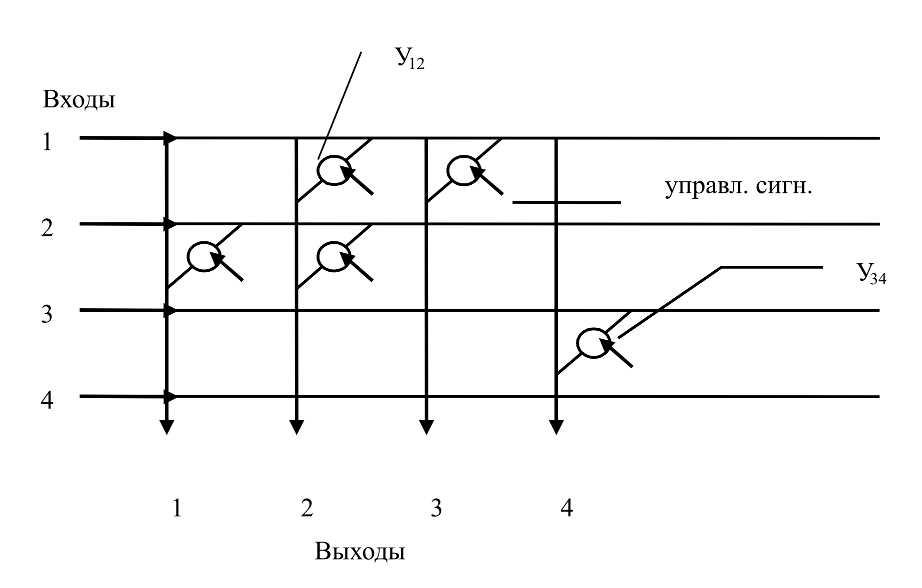


Рис. 6.8 – Коммутационная пространственная матрица

Поскольку в цифровых системах связи используются преимущественно системы передачи с временным разделением каналов (например ИКМ-30), то и системы коммутации ориентированы на работу с такими сигналами. Алгоритм работы схемы коммутации здесь будет следующим (рис. 6.9). Предположим, что абонент А занимает на первой входящей линии первый канальный интервал $КИ_1$ и его надо

соединить с абонентом В, который находится на второй исходящей линии. Тогда на коммутационный элемент $У_{12}$ надо подать управляющий импульс S_{y12} длительностью τ_k во время первого канального интервала. На выходе 2 в первом канальном интервале появится кодовое слово (байт) абонента А.

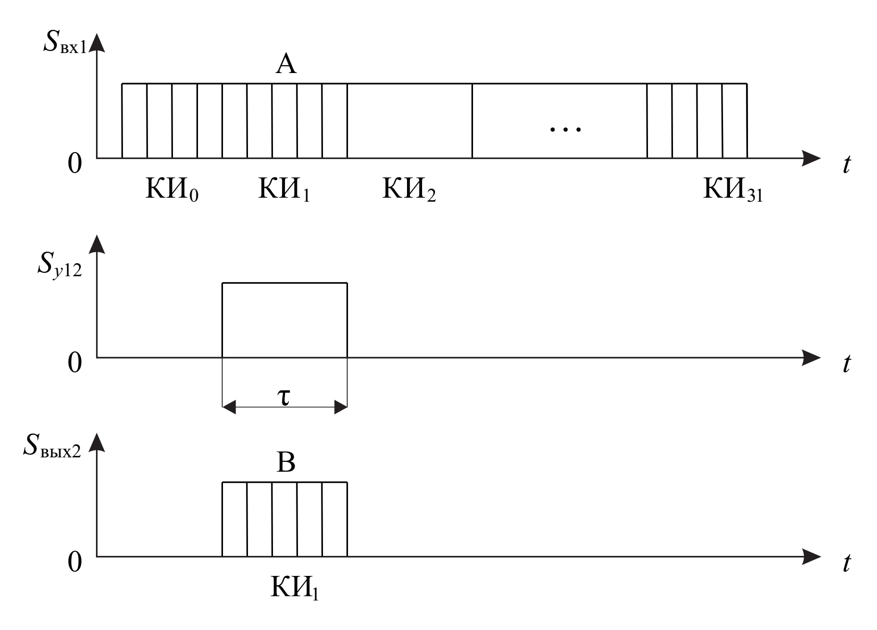
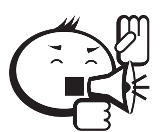


Рис. 6.9 – Временные диаграммы

Чтобы его получить, абонент В должен считать эту информацию также в КИ$_1$. В это время все элементы $У_{i2}$ второго столбца должны быть разомкнуты. Если абонент С передает свою информацию в КИ$_3$ третьей входящей линии абоненту Д, находящемуся на четвертой исходящей линии, то управляющий импульс подается на коммутационный элемент $У_{34}$ во время пятого канального интервала.

6.3 Временная коммутация



Как было отмечено в разделе 6.1, временная коммутация имеет место только для цифровых потоков с временным разделением каналов. Здесь в одном цифровом потоке (рис. 6.10) информация абонента А из второго канального интервала заносится в КИ$_{30}$, которую получает абонент В. Таким образом простейший временной коммутатор содержит одну входную и одну выходную линии.

Операция перемещения информации с одной временной позиции на другую реализуется с помощью многоканального запоминающего устройства (ЗУ) (рис. 6.11). Здесь кодовое слово каждого информационного канального интервала входящего цифрового потока (8 бит) последовательно записывается в 8-битовые ЗУ. После окончания записи начинается этап считывания. По команде управляющего устройства считывание из ячеек ЗУ происходит в другой последовательности.

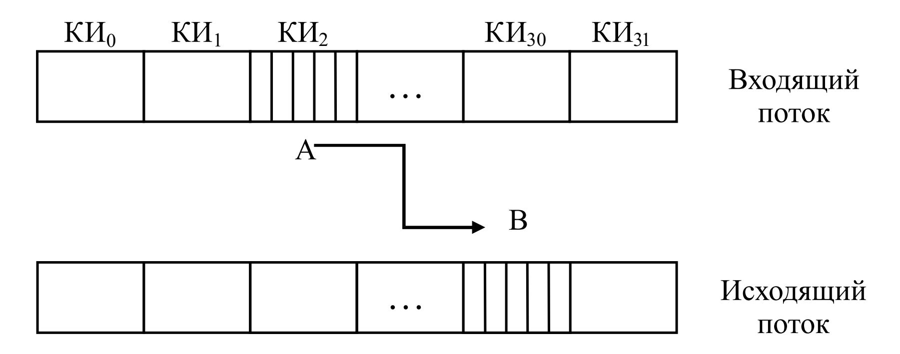


Рис. 6.10 – Принцип временной коммутации

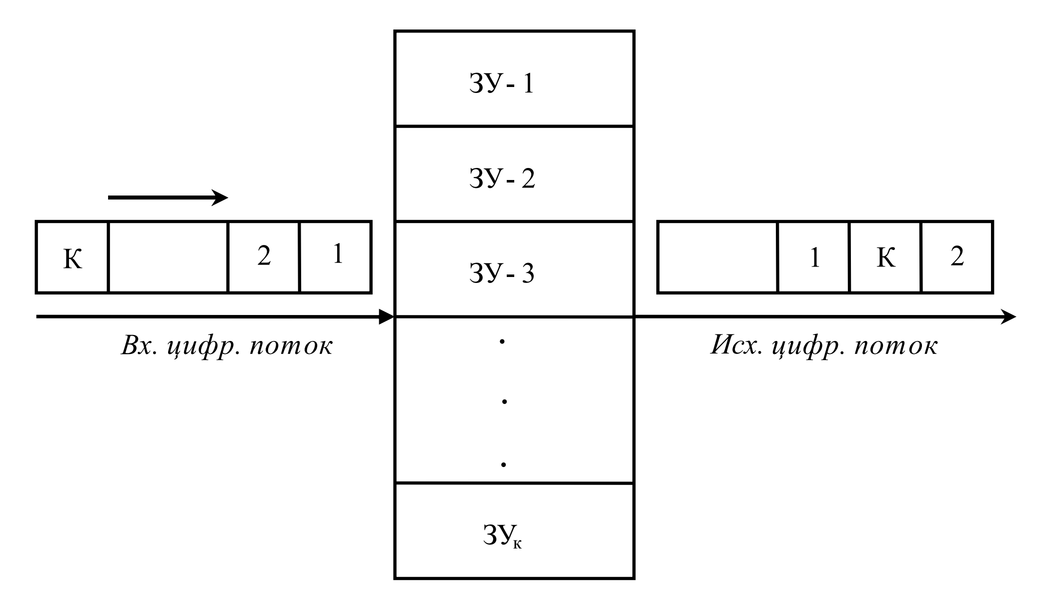


Рис. 6.11 – Временной коммутатор на ЗУ

Управляющее устройство также реализуется с помощью запоминающих устройств (УЗУ), в которых содержится информация о номерах входящих и исходящих линий, поступающая от АТС. Проиллюстрируем работу временного коммутатора совместно с УЗУ (рис. 6.12).

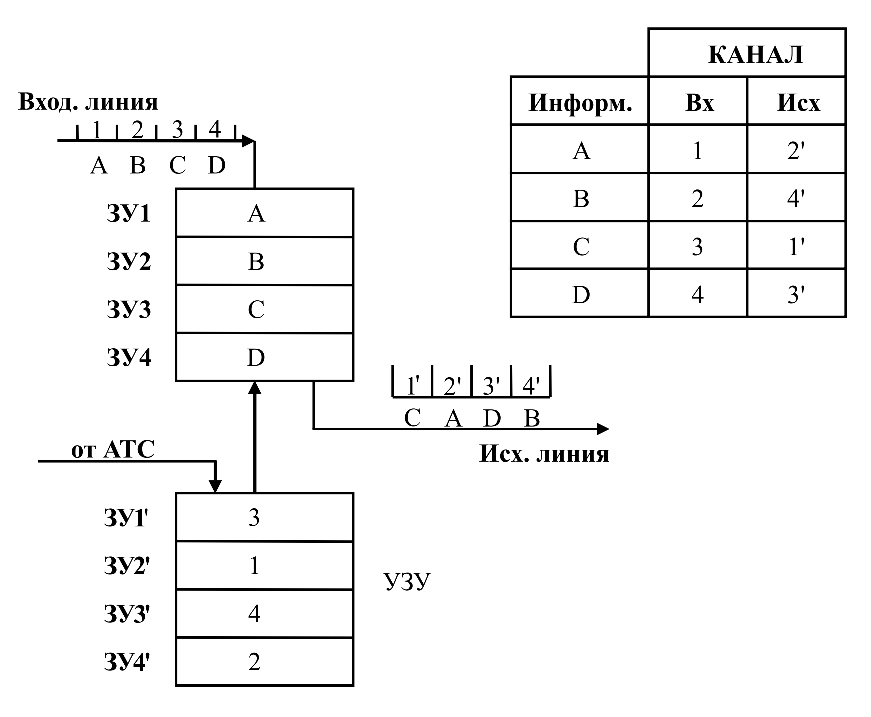
Здесь правило коммутации задается таблицей. Последовательность информации во времени будет CADB. Чтобы ее обеспечить, УЗУ должно выдать команды на считывание в такой последовательности — 3142. Эти адреса поступят в УЗУ от АТС, анализирующей сигналы управления и взаимодействия (СУВ) входных цифровых потоков.

Оценим максимальное число временных каналов (канальных интервалов) N_k, которое можно коммутировать в одном блоке ЗУ. Обращение к каждой ячейке информационного ЗУ (ИЗУ) происходит дважды за цикл: в момент записи и в момент считывания. Если время обращения t_0, то

$$N_k = \frac{\tau_ц}{2 \cdot t_0},$$

где $\tau_ц$ = 125 мкс — длительность цикла. При t_0 = 0,5 мкс, N_k = 125.

Такая емкость ЗУ достаточна для цифровой системы передачи ИКМ-120, работающей в одном направлении или для двух систем ИКМ-30 в режиме двусторонней передачи.



	КАНАЛ	
Информ.	Вх	Исх
A	1	2'
B	2	4'
C	3	1'
D	4	3'

Рис. 6.12 – Работа коммутатора с УЗУ

Управляющее ЗУ также содержит N_k слов, каждое из которых содержит 7–8 бит. Таким образом, требования к ИЗУ и УЗУ невелики. Их память должна содержать по 128×8 бит ≈ 1 кбит. Это несложные и недорогие устройства, которые гораздо проще, чем пространственные коммутаторы на герконах, электронных ключах и мультиплексорах. Поэтому они находят широкое применение в современных коммутаторах.

6.4 Распределение информации в сетях передачи данных

6.4.1 Сети с коммутацией пакетов

Распределение информации в сетях с коммутацией пакетов имеет существенные отличия по сравнению с сетями с коммутацией каналов и характеризуется разнообразием технологий.

Среди наиболее распространенных способов назовём следующие:

- случайный или поочерёдный доступ к общей среде передачи;
- коммутация пакетов с использованием MAC-адресов и таблиц коммутации;
- организация постоянных или временных виртуальных соединений;
- маршрутизация пакетов с использованием адресов сетевого уровня, например IP-адресов.

Рассмотрим эти технологии подробней. Для того чтобы все устройства, составляющие сеть (компьютеры, серверы, коммутаторы, маршрутизаторы и др.), могли взаимодействовать между собой, они имеют аппаратурный интерфейс (сетевая карта) и программный интерфейс (драйвер). Сетевая карта вместе со своим драйвером работает на канальном уровне и обеспечивает следующие функции:

- индивидуализацию компьютера в сетевом пространстве с помощью уникального MAC-адреса, который присваивается сетевой карте при ее изготовлении. Из 48 бит адреса 22 бита отводятся на идентификацию фирмы изготовителя, а 24 бита выделяются для нумерации самой карты внутри данного производства. Такой формат адреса позволяет назначить 280 триллионов различных адресов;
- распознавание своего адреса в принимаемых пакетах;
- промежуточное хранение данных и служебной информации в буфере;
- выявление нестандартных ситуаций в сети: конфликты (коллизии), искажение пакетов и др.;
- выявление ошибок;
- преобразование параллельного кода данных от компьютера в последовательный для передачи по линии;
- кодирование и декодирование сигналов к виду, удобному для эффективной передачи (линейное кодирование).

Сетевая карта и MAC-адрес — это необходимые элементы для каждой из вышеперечисленных технологий.

6.4.2 Множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий

Рассмотрим кратко множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий МДКН/ОК (рис. 6.13). Здесь все абоненты сети (СТ$_i$) подключены к общей среде передачи посредством портов П.

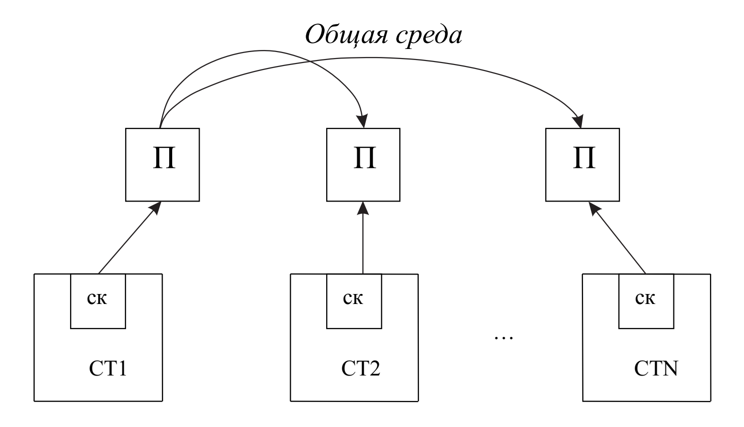


Рис. 6.13 – Схема случайного доступа к среде

С помощью приемников сетевых карт (СК) они «прослушивают» сеть. Если в сети находится какой-либо сигнал, то станции свои пакеты не передают. Если

среда свободна, то станция, готовая к передаче, посылает свои пакеты в произвольный момент времени. Такой случайный доступ к среде чрезвычайно прост и не требует специальной системы управления, однако при этом возникают конфликты (коллизии), когда две станции независимо одновременно посылают свои пакеты и они накладываются во времени. В этом случае оба пакета искажаются. Станции, обнаружив коллизию, дальнейшую передачу прекращают и вновь передают эти пакеты через некоторый случайный интервал времени. Разумеется, что вероятность возникновения коллизий тем больше, чем больше станций включено в общую среду и чем длиннее пакеты.

Наибольшее распространение к настоящему времени такая технология получила в сетях Ethernet (рис. 6.14).

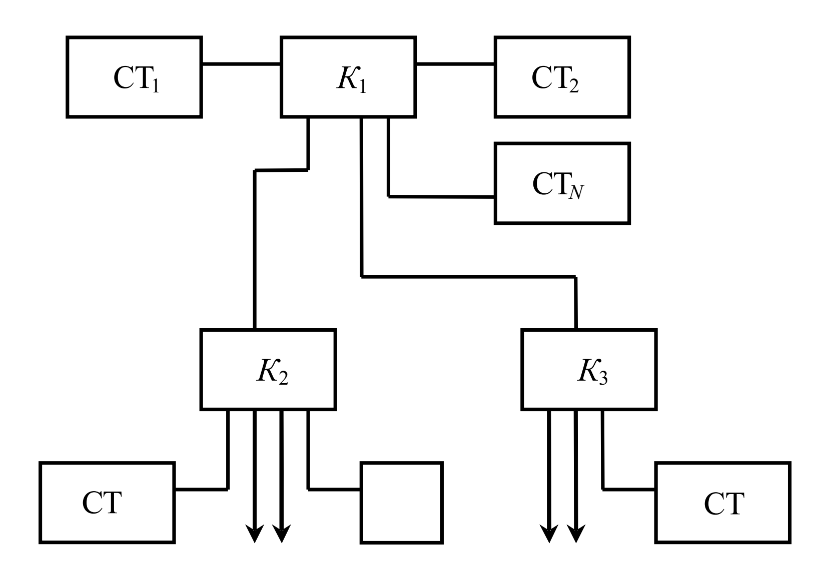


Рис. 6.14 – Схема сети Ethernet на концентраторах (хабах)

Здесь роль общей среды играют концентраторы $К_i$ и линии, их соединяющие. Концентратор (хаб) — это многопортовый повторитель, обладающий тем свойством, что сигнал, принятый приемником R_x одного из портов, повторяется на выходе передатчиков T_x всех других портов (рис. 6.15) за исключением собственного.

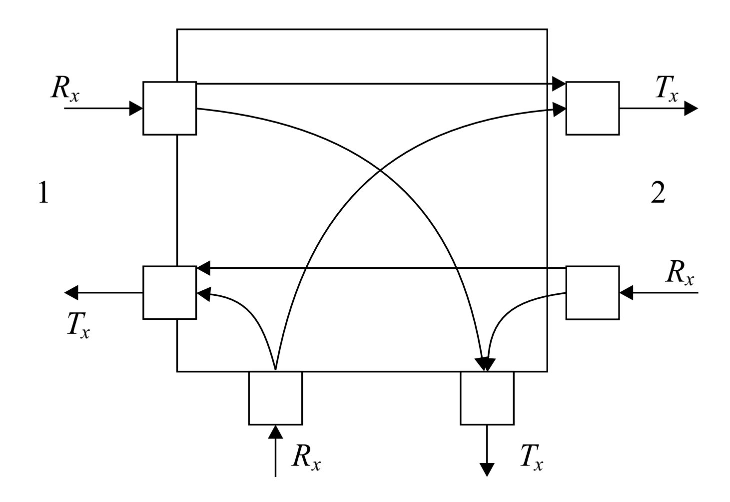


Рис. 6.15 – Принцип работы концентратора

Концентраторы могут включаться каскадно, образуя древовидную структуру сети.

Стандарты технологии Ethernet имеют много разновидностей. Основные характеристики стандартов следующие:

10 Base-T. Скорость передачи битов — 10 Мбит/с. Максимальный размер пакета — 12203 бит, а минимальный — 576. Физическая среда передачи — по две витых пары на каждый порт. Общее количество станций в сети не более 1024. Максимальное расстояние между станцией и хабом (длина сегмента) 100 м, а между любыми двумя станциями (диаметр сети) 500 м. Последнее условие необходимо для того, чтобы при минимальном размере пакета станции могли бы обнаружить коллизию до того, как закончится передача пакета.

100 Base-T, 100 Base-F, скорость передачи битов — 100 Мбит/с., физическая среда передачи: витая пара (T) и оптическое волокно (F). Длина сегмента для витой пары — 100 м, для волокна — 136 м, а диаметр сети не превышает 260 м.

6.4.3 Сети с коммутацией пакетов

Более совершенным, но и более сложным способом построения сетей является коммутация пакетов. Рассмотрим коммутацию в сетях Ethernet (рис. 6.16).

Основное отличие от сети на концентраторах заключается в том, что вместо них применены коммутаторы. В то же время все физические интерфейсы, размеры и формат кадра остались такими же, как и в классическом Ethernet.

Коммутатор Ethernet работает на канальном уровне на основе внутренней таблицы, связывающей порты коммутатора с MAC-адресами подключенных к ним устройств. Пусть, например, станция 1 с MAC-адресом A посылает пакет к станции 2 с MAC-адресом B. Коммутатор принимает пакет на порт №1 и анализирует адрес получателя. На основе таблицы он идентифицирует адрес B с портом №2, куда и посылает пакет. Основные достоинства такого виртуального соединения:

- дуплексный режим работы (full duplex);
- создается только на время передачи пакета;
- все другие порты коммутатора пакет не получают, что исключает коллизии;
- возможно одновременное попарное соединение различных портов коммутатора, что увеличивает пропускную способность узла.

Поскольку коммутатор анализирует управляющую информацию пакета, то он должен содержать буферные устройства памяти для каждого порта, чтобы записать весь пакет или его часть. В связи с этим различают следующие режимы коммутации:

- коммутация «напролет» (Cut Through). Здесь считывается только адрес назначения и сразу начинается передача на выходной порт. Такие коммутаторы обладают высоким быстродействием (задержка 150-битовых интервалов) и простотой реализации, но допускают передачу ошибочных пакетов;
- коммутация с полной буферизацией (Store and Forward). Здесь записываются даже самые длинные пакеты целиком. В таком режиме нет перегрузок за счет большого объема памяти, но вследствие этого же задержка достигает 12000 битовых интервалов.

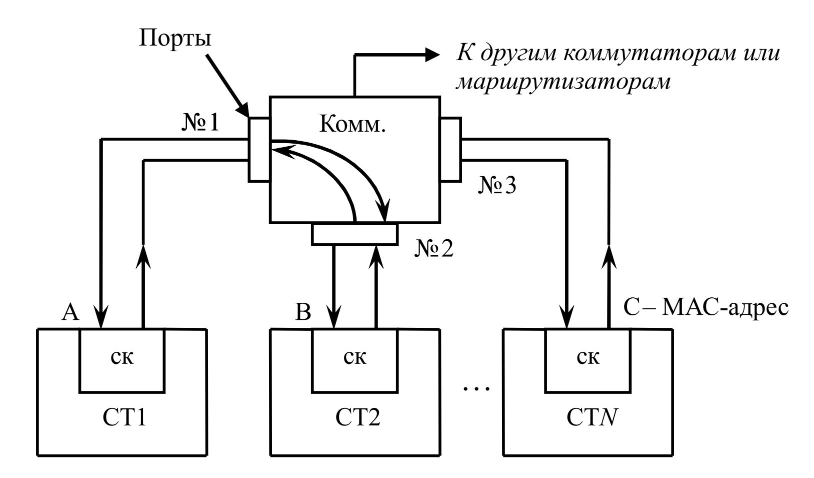


Рис. 6.16 – Построение ЛВС на основе коммутатора

Если сравнивать цифровые коммутаторы каналов с коммутаторами Ethernet, то основные отличия у них заключаются в следующем:

- коммутаторы каналов имеют небольшие ячейки памяти (8 бит), в то время как объем памяти в коммутаторах Ethernet достигает 1500 байт;
- соединение в коммутаторах каналов происходит на основании сигналов управления и взаимодействия (СУВ), передаваемых либо отдельно (ОКС №7), либо в самом цифровом потоке (КИ 16 в ИКМ–30). Соединение в Ethernet происходит в соответствии с таблицами коммутатора и MAC-адресами;
- число входных портов в КК достигает десятков тысяч, в то время как для КП это десятки единиц (16–32–64). Поэтому сети с коммутируемым Ethernet — это локальные сети предприятий с числом станций от десятков до 4–8 тысяч.

Основные недостатки сетей на коммутаторах Ethernet:

1. Сетевые карты станций даже в пределах одного подразделения имеют, как правило, случайные MAC-адреса, поскольку приобретались в разное время, а может быть и у разных производителей. Выстроить какую-либо иерархическую структуру адресации практически невозможно. Поэтому для больших сетей таблицы коммутации становятся очень громоздкими.
2. Если сеть, построенная на коммутаторах Ethernet, имеет «петли» (рис. 6.17), то информация может циклически циркулировать по ним, создавая перегрузку.
3. Коммутаторы передают широковещательные пакеты по всем направлениям, что также создает перегрузку сети и так называемые «широковещательные штормы».

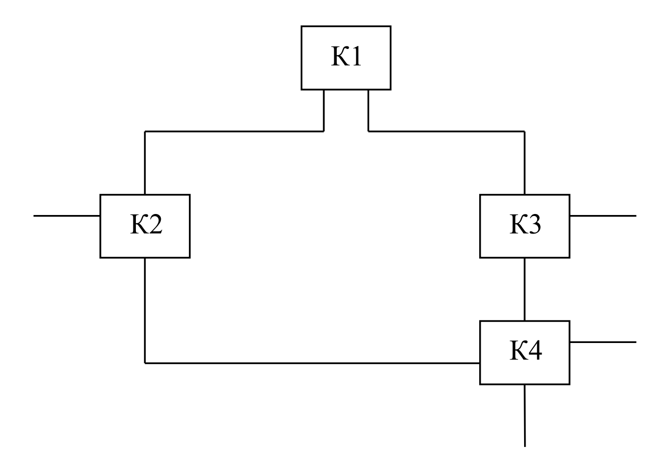


Рис. 6.17 – Сеть на коммутаторах с петлями

6.4.4 IP-сети

Для объединения ЛВС сетей предприятий и территорий в глобальные сети было предложено несколько технологий. Большинство из них, в той или иной степени, опираются на применение понятий третьего (сетевого) уровня ЭМ ВОС — понятий маршрутизации. В основе принципа маршрутизации лежит собственная система адресации, существенно отличающаяся от адресации канального уровня (МАС-адреса и др.). Рассмотрим эту систему на примере IP-адресации. IP-адреса выдаются не устройствам (сетевым картам), а пользователям (компьютерам, серверам, маршрутизаторам и т. п.) единым международным органом IANA, причем они выдаются целыми блоками крупным потребителям (организациям, операторам связи — провайдерам и т. п.). Эти потребители, в свою очередь, раздают адреса более мелким пользователям, которые включены в их сеть или взаимодействуют с ними виртуально. Таким образом, выстраивается определенная иерархия адресов «от старшего к младшему», с помощью которой проще управлять процессом распределения информации на узлах. IP-адрес состоит из 4 байт, например 190.248.15.97. Часть этого адреса, один или два первых байта, обозначает адрес узла, а остальное — адрес сети или отдельной станции, присоединенный к этому узлу. Такая структура позволяет существенно сократить объем маршрутной информации, записываемой в маршрутизаторах. В маршрутизаторах, так же как и коммутаторах, есть таблицы, содержащие основные поля: номер сети, адрес следующего маршрутизатора, номер или адрес порта и расстояние (количество промежуточных машрутизаторов или «хопов») от сети до маршрутизатора.

Пример фрагмента таблицы для маршрутизатора М1 (рис. 6.19).

Здесь первая строка описывает сеть, непосредственно подключенную к М1, а вторая сеть 135.15.42.24 «видна» в М1 через маршрутизатор М2. Предположим, что из сети передачи данных идут пакеты к М1. В адресном поле пакета есть адрес получателя, например 190.248.15.97. В то же время в таблицах всех маршрутизаторов, приближенных к М1, нет необходимости писать этот полный адрес, как и все другие адреса, входящие в класс 190.248.0.0. Достаточно сделать одну запись 190.248.0.0 в таблицах этих маршрутизаторов, и все пакеты будут направляться к порту 3 М1.

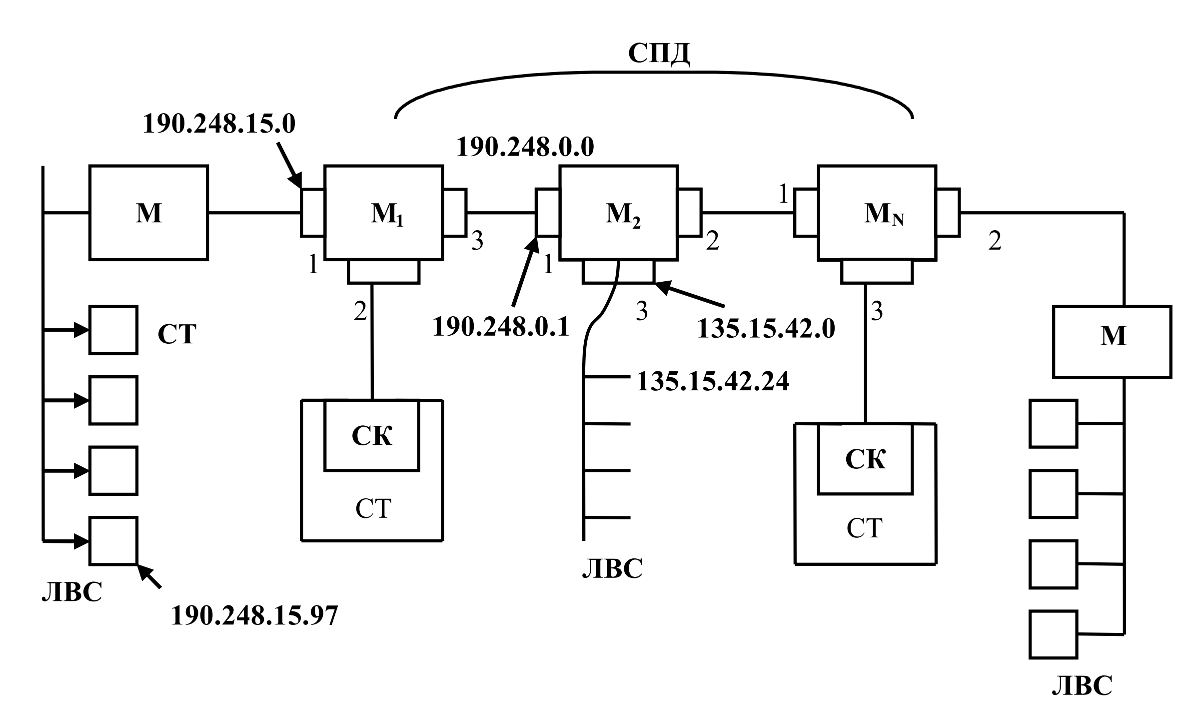


Рис. 6.18 – Сеть передачи данных на маршрутизаторах

Номер сети	Адрес следующего маршрутизатора	Порт	Расстояние
190.248.15.97	190.248.15.0	1	1
135.15.42.24	135.15.42.0	3	2
140.248.0.1	198.248.0.0	3	1

Рис. 6.19 – Фрагмент таблицы для маршрутизатора М1

Составление таблиц маршрутизации производится либо вручную администратором сети (для небольших сетей), либо автоматически с помощью специальных протоколов RIP или OSPF.

К достоинствам маршрутизации пакетов следует также отнести:

- устранение «петель», характерных для коммутаторов, поскольку маршрутизаторы имеют иерархическую структуру адресов и выбирают наикратчайший путь;
- защищенность от широковещательных штормов;
- возможность объединять сети различных протоколов канального уровня, например Ethernet и Frame Relay, на основе метода инкапсуляции. Суть этого метода состоит в следующем (рис. 6.20).

Пакет, приходящий из сети Ethernet, содержит заголовок канального уровня, заголовок сетевого уровня (IP) и данные.

В маршрутизаторе заголовок Ethernet удаляется, из заголовка IP извлекается информация о протоколе принимающей сети и адреса. На основании этой информации формируется пакет по протоколу Frame Relay с соответствующим заголовком.

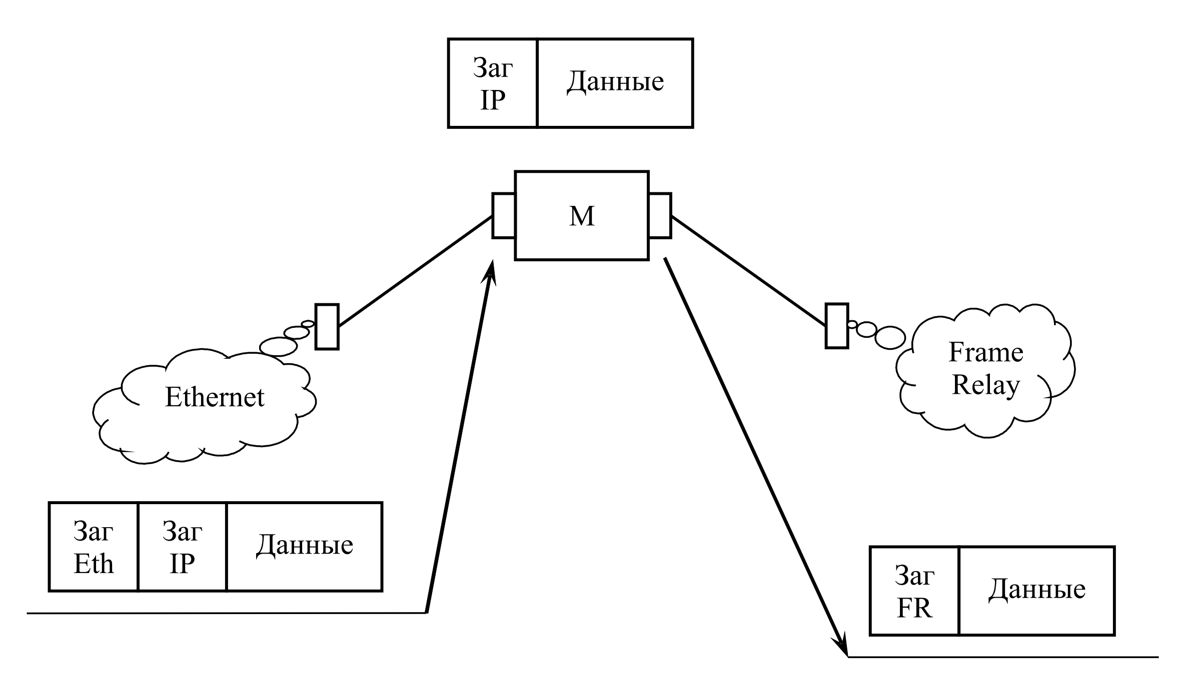


Рис. 6.20 – Объединение разнородных сетей



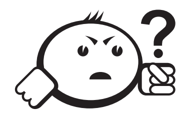
Выводы

Технология коммутации каналов используется в телефонных сетях и вследствие того, что коэффициент использования каналов составляет 10–30%, она начинает замещаться технологией коммутации пакетов.

Технология коммутации пакетов изначально была создана для передачи данных. С появлением услуг IP-телефонии и IP-телевидения она является основой для телекоммуникационных систем и сетей с интеграцией услуг.

При технологии коммутации пакетов увеличивается задержка при передаче сигналов, связанная с записью и анализом сигналов в узлах коммутации, с передачей при смене направления и т. д. Поэтому в настоящее время основные усилия разработчиков направлены на уменьшение времени задержки.

В технологии коммутации каналов наиболее простым и дешевым является способ временной коммутации. Этот способ не позволяет реализовать большую емкость коммутационного поля (до 10 000 ячеек). Для реализации больших коммутационных станций применяются сочетания пространственной и временной коммутации.



Контрольные вопросы по главе 6

1. Назовите достоинства и недостатки технологии коммутации каналов.
2. Назовите достоинства и недостатки технологии коммутации пакетов.
3. Какой принцип лежит в основе временной коммутации?
4. Дайте сравнительную характеристику MAC-адресов и IP-адресов.

Глава 7

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Рассмотрев основные телекоммуникационные системы (системы передачи, системы распределения, линии связи), мы теперь должны объединить полученные знания и дать представление о планировании, построении и развитии телекоммуникационных сетей.

В связи с тем, что современные телекоммуникационные сети строятся на основе цифровых методов передачи и распределения, мы будем, в основном, рассматривать именно цифровые сети.

7.1 Планирование сетей

При планировании сетей необходимо рассматривать два основных случая:

- сеть строится заново и ее нужно планировать с «нулевого цикла»;
- сеть построена, функционирует и ее нужно развивать как количественно, расширяя емкость каналов узлов, так и качественно, внедряя новые услуги и новые технологии.

Второй подход более распространен, поскольку цифровые телекоммуникационные сети имеют как большинство региональных операторов, так и большинство крупных корпораций.

Вместе с тем оба подхода при планировании должны удовлетворять некоторым требованиям и критериям и в том числе:

- знание абонентской базы (номерная телефонная емкость, ожидаемое число абонентов сотовой связи, СПД и ИНТЕРНЕТ);
- объем внутреннего и внешнего трафика с учетом географического расположения основных производственных и жилых зон;

- уровни требуемого качества услуг;
- состояние существующей сети;
- особенности эксплуатации (технические, климатические и др.).

С учетом этих и других специальных требований выбираются основные действия при планировании сетей:

- определение мощности узлов по полезной емкости, количеству и номенклатуре портов (SDH, PDH, Ethernet, V35 и др.);
- выбор базовых технологий передачи транспортной сети;
- выбор базовых технологий и топологии сетей доступа;
- обеспечение управления;
- обеспечение надежности и резервирования;
- планирование эксплуатационно-технического обслуживания;
- многоэтапное проектирование и бизнес-планирование.

Многоэтапность проектирования предполагает оптимизацию топологии сети и оптимизацию сети по стоимости. Оптимизация топологии транспортной сети основана на анализе структуры сети, распределения трафика между узлами и оптимизации по заданным критериям (стоимость, качество и т. п.). На основе задаваемого исходящего от абонентов трафика составляется матрица распределения трафика между узлами и сравнивается с нормативом. Нормы загрузки сети разные для разных каналов. Так, для абонентов аналоговой телефонной сети норма составляет 0,05 Эрланга. Обычно загрузка трактов между узлами определяется количеством цифровых потоков E1.

При проектировании сетей, кроме пропускной способности, необходимо также обеспечить должный уровень качества. Современные технологии передачи и распределения информации можно разделить на две группы:

- с неконтролируемым качеством обслуживания,
- с контролируемым качеством обслуживания.

К первой группе относятся технологии, обладающие большим запасом по пропускной способности. Это, например, многоволоконные ВОЛС в сочетании с SDH (STM-16, STM-64) или Gigabit Ethernet. В этих примерах некоторым недостатком является ограничение производительности мультиплексоров ввода-вывода и коммутационных станций, но в некоторых пределах она наращивается путем добавления новых модулей или заменой на более производительное оборудование. По такому пути развития идет большинство операторов ТФОП и СПД.

Во второй группе качество обеспечивается разными способами. Большинство из них было рассмотрено ранее. Это создание приоритетов в очередях, протокол RSVP, задание категорий качества в сетях Frame Relay и ATM. Все эти методы имеют пока ограниченное применение, особенно в массовых телекоммуникационных технологиях.

7.2 Примеры телекоммуникационных сетей

Современные магистральные телекоммуникационные сети строятся, как правило, на основе волоконно-оптических линий связи с применением либо технологий ВРК-SDH, либо ЧРК (аналоговое кабельное телевидение), либо передачи пакетов(ATM, Gigabit Ethernet и др.). Рассмотрим в качестве примеров сети, реализуемые в Томской области.

7.2.1 Цифровая телекоммуникационная сеть SDH

Цифровая телекоммуникационная сеть SDH (рис. 7.1) строилась поэтапно. Вначале было построено волоконно-оптическое кольцо в г. Томске на базе 16-волоконного оптического кабеля и транспортных единиц STM-1, которое объединило 5 АТС. В качестве узлового оборудования были использованы мультиплексоры ввода-вывода (МВВ). К этому кольцу были подключены цифровые АТС, выносные концентраторы (ВК) и узлы наложенной сети передачи данных (СПД). Основной нагрузкой этой сети был телефонный трафик между АТС. Впоследствии с развитием систем сотовой связи нагрузка на сеть увеличилась за счет трафика мобильной связи систем NMT-450 и GSM.

В связи с этим происходила модернизация сети путем введения на кольце модулей STM-4, STM-16, строительства дополнительного кольца, примыкающего к первому, новых цифровых АТС и выносных концентраторов, которые на рисунке не показаны.

Областной сегмент сети был выполнен на основе ВОЛС и цифровых радиорелейных линий (ЦРРЛ) в виде магистрали, последовательно соединяющей МВВ, находящиеся в районных центрах и крупных населенных пунктах, расположенных вдоль основной водной магистрали (река Обь). Основные потребители трафика те же самые, что и в городе (АТС, узлы СПД, узлы сотовой связи). В настоящее время эта магистраль для обслуживания других районов и с целью резервирования будет охвачена двумя полукольцами.

Пропускная способность всех волоконно-оптических компонентов реализуется с большим запасом, поэтому при планировании и проектировании сети основной задачей было рациональное распределение цифровых потоков с помощью МВВ.

7.2.2 Сеть передачи данных

Сеть передачи данных выполнена по комбинированной схеме путем построения выделенной магистральной сети с дополнением ее сегментами, наложенными на цифровую сеть SDH-PDH (рис. 7.2). Здесь реализовано волоконно-оптическое кольцо, соединяющее коммутаторы Gigabit Ethernet. Использование коммутаторов в опорной части сети обеспечивает высокие скорости передачи данных и экономичное использование оптических линий связи. К коммутаторам подключены маршрутизаторы высокого уровня. Их применение обеспечивает функционирование сети на третьем (IP) уровне и высокую защищенность как непосредственно сети передачи данных, так и данных абонентов от несанкционированного доступа.

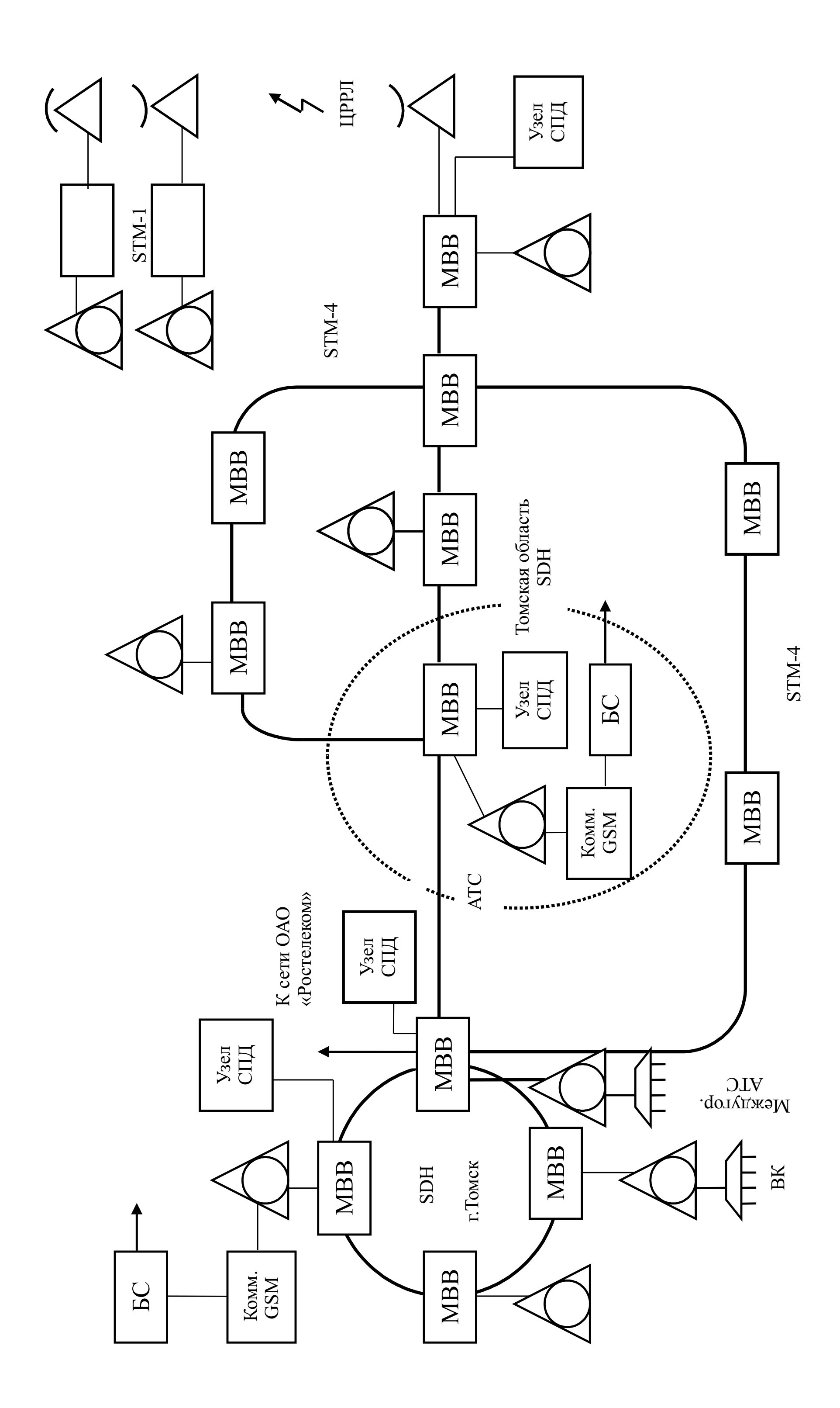


Рис. 7.1 – Цифровая сеть SDH

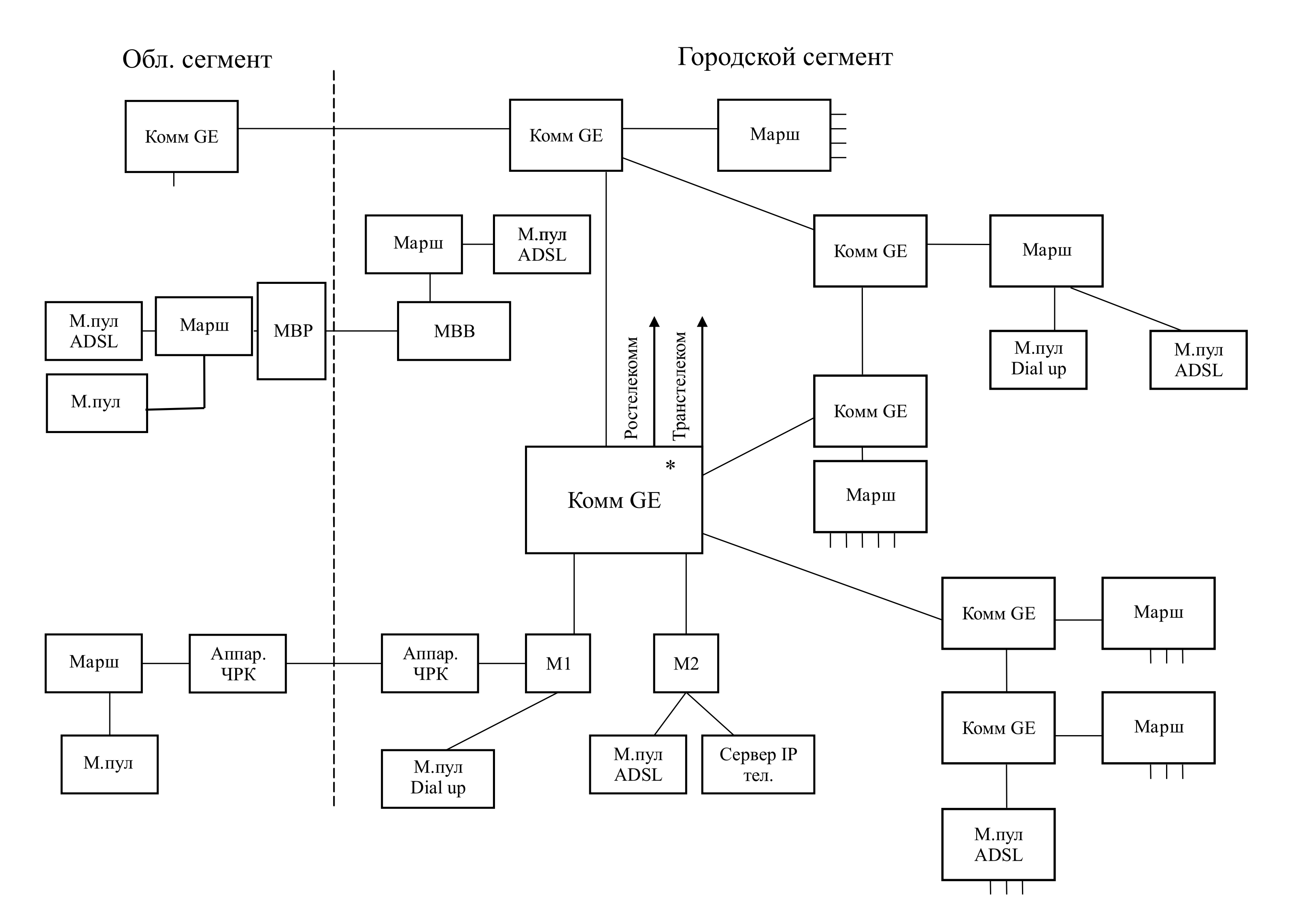


Рис. 7.2 – Областная сеть передачи данных

К коммутаторам опорного кольца также по волоконно-оптическим каналам связи подключены коммутаторы Fast Ethernet или Gigabit Ethernet по радиальной схеме. В составе узлов СПД, как правило, присутствуют маршрутизаторы M_i, к портам которых подключаются фрагменты сетей доступа (модемные пулы dial up, модемные мультиплексоры ADSL(DSLAM) или просто абоненты, работающие по выделенным оптическим или медным (DSL) линиям).

Наиболее мощный узел СПД помимо того, что он собирает значительную долю трафика сети, осуществляет функционирование наложенной сети СПД. Это реализуется либо на потоках $n*$E1 через цифровую сеть SDH и мультиплексоры ввода-вывода, либо через аналоговую телефонную сеть и аппаратуру ЧРК, объединяющую некоторое количество каналов тональной частоты. По этой технологии работает областной сегмент СПД и некоторые узлы в городе.

Кроме этого, к центральному узлу подключен сервер доступа IP-телефонии и порты выхода в сеть передачи, двух независимых внешних операторов. Таким образом, обеспечивается надежное резервирование внешнего канала.

Сеть передачи данных также используется как опорная сеть для организации корпоративных сетей различных организаций как в пределах города, так и по области и всей России. В этом случае для абонентов организуется своя виртуальная сеть поверх СПД. Такая сеть позволит осуществить взаимодействие между удаленными адресами со скоростями 2\10\100\1000 Мбитс и обеспечит прозрачность сетевых сервисов.

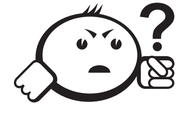


Выводы

При построении телекоммуникационных систем и сетей необходимо разделять задачи передачи информации и распределения информации. При этом необходимо учитывать типы и характер предоставляемых услуг, количество абонентов, требуемую скорость и качество передачи.

Развитие телекоммуникационных систем идет по пути внедрения цифровых методов, всестороннего применения методов коммутации пакетов и интеграции служб и услуг.





Контрольные вопросы по главе 7

1. Каковы достоинства кольцевой схемы системы SDH?
2. Назовите основные способы доступа к сети передачи данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективы развития телекоммуникационных систем и сетей заключаются в развитии цифровых методов передачи, расширении зоны применения волоконной оптики и систем радиосвязи, широком применении технологий коммутации пакетов.

В области волоконно-оптических линий связи перспективно спектральное уплотнение (ЧРК), когда в одном волокне передаются сигналы от нескольких независимых световых источников. В области радиосвязи интенсивно применяются технологии коммутации пакетов. Быстро развиваются технологические сети (Bluetooth, ZigBee), мобильные сети четвертого поколения, технологии OFDM. В области пакетных технологий доминирующее место занимают IP-системы (IP-телефония, IPTV, сети с интеграцией услуг NGN).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Цифровые и аналоговые системы передачи / В. И. Иванов [и др.]. — М. : Горячая линия — Телеком, 2003. — 232 с.

[2] Крук Б. И. Телекоммуникационные системы и сети / Б. И. Крук, В. Н. Попантонопуло, В. П. Шувалов. — Горячая Линия — Телеком, 2003. — Т. 1. — 648 с.

[3] Беллами Дж. Цифровая телефония : пер. с англ. / Дж. Беллами. — М. : Эко-Трендз, 2004. — 640 с.

[4] Винокуров В. М. Цифровые системы передачи : учеб. пособие / В. М. Винокуров ; Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. — Томск : ТУСУР, 2006. — 159 с.

[5] Кулева Н. Н. Транспортные технологии SDH и OTN / Н. Н. Кулева, Е. Л. Федорова. — СПб. : ГОУВПО СПбГУТ, 2009. — 96 с.

[6] Ефанов В. И. Электрические и волоконно-оптические линии связи : учеб. пособие / В. И. Ефанов. — Томск : ТУСУР, 2007. — 150 с.

[7] Андреев В. А. Направляющие системы электросвязи / В. А. Андреев. — М. : Горячая линия — Телеком, 2009. — Т. 1: Теория передачи и влияния. — 424 с.

[8] Баркун М. А. Цифровые системы синхронной коммутации / М. А. Баркун, О. Р. Ходасевич. — М. : Эко-Трендз, 2001. — 187 с.

[9] Винокуров В. М. Сети связи и системы коммутации / В. М. Винокуров. — Томск : ТМЦДО, 2005.

[10] Гольдштейн Б. С. IP-телефония / Б. С. Гольдштейн, А. В. Пинчук, А. Л. Суховицкий. — М. : Радио и связь, 2001. — 334 с.

[11] Фокин В. Г. Оптические транспортные сети / В. Г. Фокин. — Новосибирск : Сиб ГУТИ, 2003. — 157 с.

[12] Олифер В. Г. Компьютерные сети / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб. : Питер, 2006. — 958 с.

[13] Валов С. Г. Информационные сети будущего / С. Г. Валов, А. В. Голышко // Вестник связи. — 2003. — №№2–6.

[14] Гургенидзе А. Т. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа / А. Т. Гургенидзе, В. И. Кореш. — СПб. : Наука и техника, 2003. — 400 с.

[15] Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневский [и др.]. — М. : Техносфера, 2005. — 592 с.

[16] Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Бернард Скляр. — М. : Вильямс, 2003. — 1104 с. : ил.

[17] Бакланов И. SDH-NGSDH. Практический взгляд на развитие транспортных сетей / И. Бакланов. — М. : Метротек, 2006. — 736 с. : ил.

[18] Томаси У. Электронные системы связи / У. Томаси. — М. : Техносфера, — 2007. — 1358 с.

ГЛОССАРИЙ

АЦП — преобразование аналогового сообщения в цифровою форму. Содержит 2 обязательные процедуры (дискретизация во времени и квантование по уровню) и 1 необязательную — импульсно-кодовую модуляцию.

Временная коммутация — процедура передачи информации из одного цифрового канала в другой основанная на записи информации разных каналов в одной последовательности и считывания ее в другой.

Дуплексный канал передачи — образован двумя встречными односторонними каналами для двухсторонней связи.

ИКМ 30/32 — первичный цифровой канал, содержащий 30 информационных и 2 служебных каналов со скоростью передачи 64 кбит/сек.

Интеграция услуг заключается в том, что к абоненту по одной линии связи приходят электрические сигналы разных служб. Здесь с помощью устройства распределения услуг они разделяются по соответствующим терминальным устройствам (телефонный аппарат, модем, телевизионный приемник и т. д.). Самым радикальным случаем является тот, когда по линии связи одновременно приходят услуги телефонии, телевидения и передачи данных. Однако на настоящий момент для массового абонента такого сервиса еще нет, и на практике применяют попарную интеграцию.

Канал передачи начинается и оканчивается у абонентов, но не включает в себя оконечные терминальные устройства.

Коммутатора основная функция — установление и разрыв соединения между двумя каналами передачи.

Коммутация каналов — технология сквозного соединения двух абонентов через сеть АТС на время сеанса связи. Может быть реализована как в аналоговой, так и в цифровой формах.

Коммутация пакетов — технология передачи информации, когда цифровой сигнал разбивается на отдельные фрагменты (пакеты), к ним добавляется заголовок, который содержит информацию об адресе получателя. Такой пакет через сеть маршрутизаторов передается индивидуально.

Компандирование — вид кодирования, предусматривающий процедуру сжатия динамического диапазона и неравномерного квантования по уровню.

Линейное кодирование (преобразование к коду передачи) — преобразование однополярного цифрового сигнала к виду, эффективному для передачи на большие расстояния с низким уровнем потребления энергии, высокой помехоустойчивостью и стабильностью связи. Чаще всего реализуется с применением биполярных сигналов и импульсных комбинаций, не допускающих нулевых пауз.

Линия передачи — физическая среда распространения электромагнитных волн, несущих сообщение. После прохождения линии передачи сигнал испытывает обратное преобразование. В качестве линии передачи используются разные виды кабелей. На сегодняшний день одними из самых популярных являются витая пара и оптоволокно. Также довольно широко используются радиорелейные и спутниковые линии связи.

Нелинейные помехи — возникают как в сугубо нелинейных приборах (преобразователи частоты, детекторы и т. п.), так и в усилительных элементах, особенно в ограничителях и выходных каскадах усилителей мощности за счет отклонения их вольт-амперной характеристики от линейной.

Оптический кабель представляет из себя скрученные оптические волокна (4–32 штуки) из кварцевого стекла. В них используется явление полного внутреннего отражения. Работают волокна в инфракрасном диапазоне при длине волны $\lambda = 0{,}85 - 1{,}6$ микрометров.

Пакетизация. Заключается в том, что цифровой поток разбивается на отдельные порции (пакеты). Каждому пакету добавляется заголовок, в котором содержится адрес получателя. В телекоммуникационной сети каждый пакет может продвигаться самостоятельно с помощью протоколов маршрутизации. Достоинство такой технологии заключается в том, что степень загруженности телекоммуникационных каналов приближается к 100%, поскольку в одном канале одновременно могут передаваться пакеты различных абонентов.

Переходные помехи — помехи в АСП на электрических кабелях возникают в основном за счет электромагнитной связи между параллельными парами проводников в многопарных кабелях.

Плезиохронная цифровая иерархия (PDH) — иерархическая система цифровых потоков, основанная на объединении отдельных потоков с независимами тактовыми генераторами. В этой системе скорости передачи информации изменяются от 2 Мбит/сек. до 140 Мбит/сек.

Сетевые узлы — комплексы технических и программных средств, которые образуют долговременные (некоммутируемые) соединения групповых трактов и каналов.

Сетевые станции — сетевые узлы, в которых осуществляется распределение каналов и групповых трактов между вторичными сетями.

Сеть связи или сеть передачи информации — система, распределяющая информацию.

Синхронная цифровая иерархия SDH — иерархическая система цифровых потоков, основанная на объединении отдельных потоков с единым высокостабильным тактовым генератором. В этой системе скорости передачи информации изменяются от 155 Мбит/сек. до 40 Гбит/сек.

Система передачи — канал передачи вместе с оконечными устройствами.

Тактовая синхронизация — обеспечивает равенство частот повторения импульсных последовательностей на передающей и приемной сторонах линий связи.

Цикловая синхронизация — предназначена для обозначения начала передачи группового сигнала.

Цифровизация. Переход к цифровым сигналам обеспечивает высокую помехоустойчивость передачи, повышает ее качество и надежность, существенно сокращает вес и габариты оборудования. Поскольку представление цифрового сигнала одинаково для всех видов трафика, то это создает реальную платформу для их объединения в одном канале передачи.

Частотное разделение каналов (ЧРК) — способ объединения (разделения) сообщений различных абонентов, когда их сигналы отличаются по частоте. Они передаются одновременно в разных частотных полосах.

Электрический кабель — это электротехническое изделие, содержащее изолированные друг от друга проводники, объединенные в одну конструкцию.

Эталонная модель взаимодействия открытых систем — позволяет сложный процесс передачи информации представить в виде разбиения ее на простые процессы. Модель содержит 7 иерархических уровней. Наибольший интерес представляют 3 нижних уровня: физический, канальный, сетевой.

Учебное издание

Пуговкин Алексей Викторович

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
И СЕТЕЙ

Учебное пособие

Корректор Осипова Е. А.
Компьютерная верстка Зубкова А. О.

Подписано в печать 20.02.14. Формат 60x84/8.
Усл. печ. л. 18,135. Тираж 300 экз. Заказ

Издано в ООО «Эль Контент»
634029, г. Томск, ул. Кузнецова д. 11 оф. 17
Отпечатано в Томском государственном университете
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
Тел. (3822) 533018.